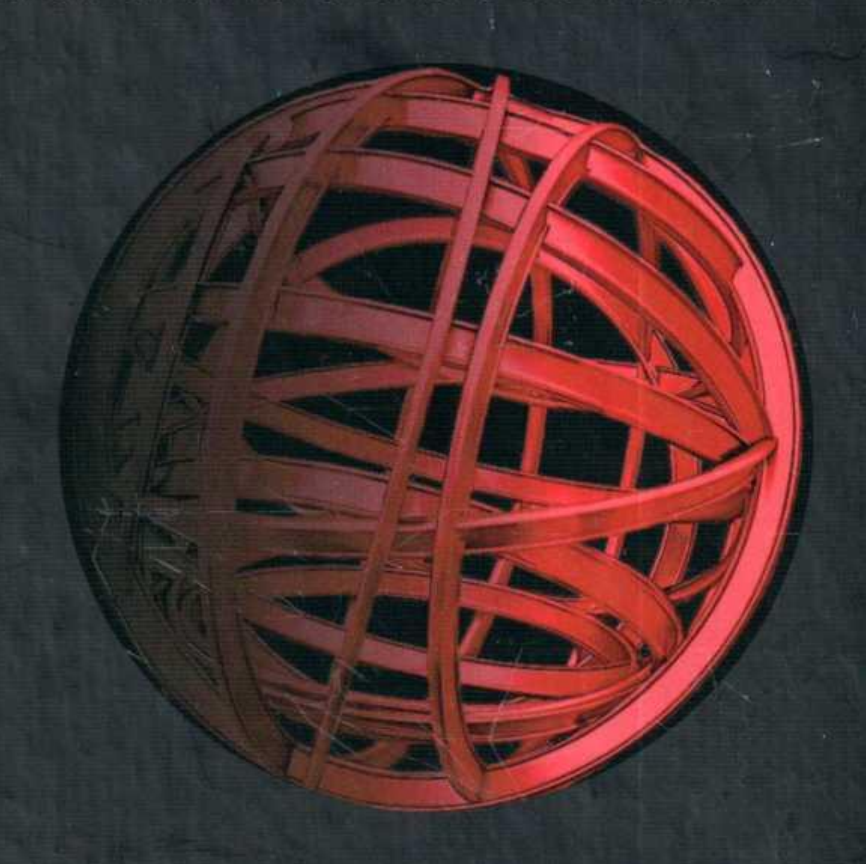
новые теории всего

в поисках окончательного объяснения



ДЖОН БАРРОУ

УДК 524.8
ББК 22.632
Б25

Перевел с английского *И. А. Самсонов* по изданию:
NEW THEORIES OF EVERYTHING
(The Quest for Ultimate Explanation) / by John D. Barrow
Охраняется законом об авторском праве. Нарушение ограничений, накладываемых им на воспроизведение всей этой книги или любой ее части, включая оформление, преследуется в судебном порядке.

Барроу, Д.
Б25
Новые теории всего / Д. Барроу; пер. с англ. II. А. Самсонов. – 2-е изд. – Минск: Попурри, 2013. – 368 с.: ил.
ISBN 978-985-15-1932-9.

Предлагается обзор новейших открытий и теоретических разработок в физике и космологии, которые позволяют проникнуть в самое сердце Вселенной.

Для широкого круга читателей.

УДК 524.8
ББК 22.632

Научно-популярное издание

БАРРОУ Джон
НОВЫЕ ТЕОРИИ ВСЕГО

2-е издание
Перевод с английского – *П. А. Самсонов*
Оформление обложки – *МВ Драко*

Подписано в печать 26.03.2013.
Формат 84x108 1/32-Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 19,32. Уч.-изд. л. 16,85. Тираж 3500 экз. Заказ 303.

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.39.953.Д.002684.02.10 от 18.02.2010 г.
ООО "Попурри". Лицензия № 02330/0548529 от 03.02.2009.
Республика Беларусь, 220113, г. Минск, ул. Мележа 5, корп. 2, к. 403.
Отпечатано по технологии CtP
в ООО "Полиграфический комплекс "ЛЕНИЗДАТ"
194044, Санкт-Петербург, ул. Менделеевская, д. 9.
Телефон / факс: (812) 495-56-10.

ISBN 978-0-19-280721-2 (англ.)
ISBN 978-985-15-1932-9 (рус.)

© John D. Barrow 2007
© Перевод. Издание на русском языке.
Оформление. ООО "Попурри", 2012

*Посвящается РОДЖЕРУ,
который до сих пор верит,
что всегда должно быть что-то
там, где нет ничего.*

ДЖОН БАРРОУ

НОВЫЕ ТЕОРИИ ВСЕГО

специально для www.koob.ru

Предисловие ко второму изданию

Я рад предоставленной мне издательством "Press" возможности подготовить переиздание данной книги. Интерес к этой тематике не ослабевает с тех пор, как я предпринял первые попытки рассказать обо всем многообразии существующих теорий и об ограничениях, присущих каждой из них, и рассмотреть их в более широком культурном контексте, не ограничиваясь строгими рамками математической физики. В процессе уточнения и совершенствования теории струн возникли новые возможности, и космология совершила неожиданный поворот в сторону реальности, населенной множеством других возможных вселенных. Такое развитие событий подорвало наивные надежды многих на существование некоей уникальной "теории всего", которая четко и полностью объяснила бы, какие именно качества Вселенной сделали возможным появление жизни в ней. Предстоит пройти еще очень долгий путь, прежде чем будет сформулирована и окончательно утверждена физическая, по-настоящему научная "теория всего". А пока этого не произошло, я надеюсь, что предлагаемый обзор новейших открытий и теоретических разработок в физике поможет читателям выбрать правильное направление и осветит их путь.

Джон Барроу

Кембридж, февраль 2007 года

Предисловие к первому изданию

"Всё" – тема большая и сложная. Однако современные ученые считают, что наткнулись на ключ к математической тайне, позволяющей проникнуть в самое сердце Вселенной, что они на пороге открытия, которое указывает путь к монументальной "Теории всего", объединяющей все законы природы в общую формулу. Последняя явственно покажет неизбежность того, что было, есть и будет в физическом мире. Такие мечты не новы; сам Эйнштейн последние годы жизни посвятил бесплодным поискам такой "теории всего". Но сегодня этой темой увлечены не только диссиденты от философии и вольнодумцы; она проникла в святая святых теоретической фишки, и над ней работают самые светлые умы мировой науки. Такой поворот событий поднял ряд глубоких вопросов. Имеют ли поиски "теории всего" реальные шансы на успех? Можем ли мы до конца осознать логику, лежавшую в основе физических реалий? Можно ли предвидеть, что придет день, когда законы фундаментальной физики приобретут полный и законченный вид, так что нераскрытыми останутся лишь некие наиболее сложные детали в рамках нерушимых законов? Правильно ли считать решение этого вопроса новым передним краем, фронтиром абстрактного мышления?

Эта книга является попыткой описать, с какими трудностями сталкиваются на самом деле разработчики "теорий всего", выделить те аспекты мирового порядка вещей, которые необходимо понять в первую очередь, прежде чем мы будем вправе рассчитывать на постижение всего остального. Мы попытаемся показать, что, даже если создание "теории всего", в существующем понимании этого термина, является действительно необходимым, чтобы мы проникли в тайны Вселенной, которая вокруг и внутри нас, этого может оказаться совершенно недостаточно. Мы познакомим читателей с теми дополнительными вопросами, требующими решения для полноты наших знаний, и при этом разберем множество новых

идей и спекуляций, которые выходят далеко за рамки традиционного мышления и сложившихся методов научного познания.

Выходу в свет этой книги способствовали очень многие люди. Сенат университета Глазго в январе 1988 года пригласил автора прочитать серию лекций, и данная книга в значительной мере представляет собой дальнейшую переработку содержания этих выступлений. Я особенно признателен Нейлу Спервею, который всесторонне помогал мне в подготовке материалов для тех лекций. За комментарии и критические замечания, высказанные в отношении этой книги еще на стадии рукописи, я хочу выразить благодарность Дэвиду Бейлину, Маргарет Боден, Данко Босанаку, Грегори Чейтину, Полу Дейвису, Бернару д’Эспанья, Джефри Фридмену, Майклу Грину, Крису Ишему, Джону Мэнджеру, Биллу Маккри, Леону Местелю, Джону Полкингорну, Аарону Сломану, Джону Мейнарду Смиту, Нейлу Спервею, Юэну Сквайрсу, Рене Тому, Фрэнку Типлеру, Джону Уиллеру, Дэнису Уилкинсону, Питеру Уильямсу и Тому Уилмору.

Писать книгу – работа тяжелая, и это относится не только к автору, но и ко всем, кто так или иначе задействован в процессе, вовлечен в его орбиту. В этой связи хочу особо поблагодарить своих родных и близких за терпение и понимание. Элизабет оказывала мне постоянную и всестороннюю поддержку; без нее эта работа даже не смогла бы начаться. Огромное спасибо и нашим детям, Дэвиду, Роджеру и Луизе, которые с большим вниманием следили за прогрессом книги, хотя без их активного участия работу, наверное, удалось бы завершить вдвое быстрее.

Дж. Д. Б.

Брайтон, сентябрь 1990 года

Выражение благодарности

Рисунки 7.2, 7.3 и 7.4 взяты из книги Ханса Моравеца "Дети разума" ("Mind Children") с любезного разрешения издателей. Рисунок 7.6 воспроизведен с разрешения владельца авторских прав, художника Р. В. Соле.

Глава 1

ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ

Я еще не встречал сложную проблему, которая не становилась бы еще сложнее, если правильно на нее взглянуть.

Пол Андерсон

Восьмеричный путь

Мне представлялось чем-то возвышенным знать причины каждого явления – почему что рождается, почему погибает и почему существует.

Сократ

Как, когда и зачем возникла Вселенная? Подобные вопросы не выходят из моды на протяжении многих веков. Ученые привыкли их остерегаться, отдав на откуп теологам и философам, которым они гоже успели прискучить. Но вдруг физики со всей серьезностью стали обращаться к этим проблемам, а теологи обнаружили, что новое поколение ученых все смелее вторгается на их территорию и своими математическими рассуждениями оказывает влияние на их образ мышления. К сожалению, плодотворный диалог между богословами и физиками затруднен тем обстоятельством, что, с одной стороны, мало кто из теологов обладает достаточным образованием, чтобы суметь вникнуть в детали, а с другой – мало кто из физиков проявляет интерес к вопросам более широкого порядка, выходящим за рамки их научной дисциплины. Первые думают, что понимают суть вопроса, но не знают ответа; вторые полагают, что знают ответ, но непонятен сам вопрос. Оптимисты могут надеяться найти в этом диалоге рецепт просветления, однако пессимисты не без оснований возражают, что наиболее вероятным

результатом будет ситуация, при которой мы останемся и без вопросов, и без ответов.

Современные ученые считают, что наткнулись на ключ к математической тайне, позволяющей проникнуть в самое сердце Вселенной. Они видят себя на пороге открытия, указующего путь к монументальной "Теории всего", единой, всеобъемлющей картины, объединяющей все законы природы в общую формулу, из которой с безупречной логичностью должна вытекать неизбежность всего сущего. Обладая таким космическим розеттским камнем, мы прочли бы книгу природы всех времен и поняли, что было, есть и будет.

Вокруг подобной перспективы всегда было множество спекуляций, но никогда не было уверенности. Ныне убежденность появилась, но оправдана ли она? На этот вопрос читатель сможет ответить, перевернув последнюю страницу данной книги. Нам предстоит разобраться в различных компонентах, из которых должна складываться любая научная картина мира. Вполне вероятно, что они окажутся более разнообразными и трудноуловимыми, чем предполагали ученые, ранее пытавшиеся разрабатывать различные версии "теорий всего". Разумеется, нужно с большой осторожностью пользоваться столь категоричным понятием, как "всё". Мы включаем в него творчество Шекспира, Тадж-Махал и Мону Лизу? Нет, конечно. О том, как частности укладываются в общий порядок вещей, мы еще будем говорить. Это разграничение чрезвычайно важно проводить, приступая к изучению природы. Нам необходимо четко понимать, существуют ли в окружающем мире вещи, которые не укладываются непосредственным образом в математически предопределенный мир науки. Мы увидим, что они есть, и постараемся разобраться, как их отличить от тех кодифицируемых и вполне предсказуемых научных составляющих любой "теории всего".

Оглядываясь на тысячелетия человеческого опыта, можно увидеть, сколь многое достигнуто за последние 300 лет, с тех пор как Ньютон привел в движение процесс математизации природы. Мы обнаружили, что мир удивительным образом поддается простому математическому описанию. То, что его можно описать математически, – само по себе загадка; но описать с помощью простых математических формул, в которых можно более-менее разобраться за несколько лет учебы, – это великая тайна внутри загадки.

Относиться к такому положению вещей можно по- разному. Ньютоновскую революцию в науке можно рассматривать как обнаружение

отмычки, открывающей все новые и новые двери природы, если ею постоянно пользоваться. И хотя скорость, с которой делаются открытия, в последнее время сильно возросла, это не может продолжаться бесконечно. Современные темпы открытия фундаментальных (или кажущихся таковыми) истин еще не означают, что мы вплотную подошли к тому месту, где зарыт клад. Поиски могут затянуться еще на долгие годы – либо потому, что природа воистину беспредельно многообразна, либо выбранный метод ее описания, хоть и позволяет добиться желаемого уровня точности, всегда, в любой момент времени представляет собой лишь асимптотический ряд приближений, который может достичь полного совпадения с реальностью только после бесконечного количества уточняющих поправок. Согласно пессимистической точке зрения особенности человеческого разума и груз эволюционного прошлого накладывают непреодолимые ограничения на то, что доступно нашему познанию. С какой стати наши когнитивные процессы и умственные способности должны быть приспособлены к такому сумасбродному и экстравагантному времяпрепровождению, как попытки понять происхождение и устройство Вселенной? Разве не более резонно предположить, что Вселенная, говоря словами Холдейна, "слишком причудлива, чтобы мы могли ее понять до конца"? Что бы мы ни думали о своем месте в истории науки, мы все-таки разделяем сомнения Коперника в отношении способности человеческого разума познать законы Природы во всей их полноте. С какой стати это должно быть нам под силу? Но есть и более оптимистический взгляд. Согласно ему, наши недавние успехи свидетельствуют о наступлении золотого века науки, который достигнет апогея и приблизится к полной самореализации в начале XXJ столетия. После того как фундаментальная наука вступит в стадию большей или меньшей завершенности, нам все равно останется еще много чего открыть, но это уже будут детали, вопросы практического приложения известных принципов, шлифовка формулировок и метафизических размышлений. Будущие историки науки назовут прошлое и нынешнее столетия временем, когда были открыты законы Природы.

Все это мы уже видели. Вполне возможно, что с приближением конца очередного столетия у людей возникает психологическое желание подвести итоги и довести до благополучного завершения все начатое ранее. В конце XIX века многие думали, что наука практически все расставила по местам и осталась самая малость, чтобы считать дело сделанным. В Пруссии закрыли патентное бюро, поскольку были уверены, что изобретение – факт уже невозможный. Но примерно в это же время младший сотрудник другого

патентного бюро, в Берне, создавал теорию, которая перевернула сложившиеся представления о мироздании и дала мощнейший толчок всестороннему развитию физики в XX веке.

Можно ли надеяться, что полное объяснение мирового порядка будет найдено? Возможна ли "теория всего" и о чем она могла бы поведать? Что она включала бы в себя? Природа любого научного исследования такова: в начале пути никогда не знаешь, что ждет в конце. В настоящий момент мы не можем даже сказать, какие научные дисциплины придется включить в такую всеобъемлющую картину мира. Ведь история преподносила весьма любопытные уроки на сей счет. Сегодня физики принимают как данность атомистическую теорию, утверждающую, что все материальные тела созданы из одних и тех же элементарных частиц. Такой взгляд поддерживается всеми объективными наблюдениями. Этому учат во всех университетах. Однако сама теория зародилась в Древней Греции как учение философское, даже мистическое, если угодно – религиозное, поскольку никаких явных доказательств не было. Тысячи лет прошли, прежде чем появились средства, позволившие собрать факты. Атомизм родился как философская идея, которая не смогла бы пройти ни одного испытания, каким подвергается в наши дни любая теория, претендующая на звание научной, но эго не помешало ей стать одним из краеугольных камней физики. Поэтому есть все основания подозревать, что и сегодня существуют идеи, которые по современным критериям научности представляются беспочвенными, но в будущем займут свое место в общепринятой научной картине мира.

В следующих главах мы займемся поисками окончательного объяснения и вкратце рассмотрим древние и современные прецеденты. Однако следует иметь в виду, что знание такой "теории всего" – если она вообще существует – может быть необходимым фактором постижения окружающего физического мира, но ни в коем случае не достаточным. Есть и другие ингредиенты, без которых паши знания обречены оставаться неполными и неокончательными, а значит, и мечта о построении всеобъемлющей картины мира не может быть реализована. Мы увидим, что постижение Вселенной складывается из знания восьми необходимых ингредиентов:

- физические законы;
- начальные условия;
- идентификация сил и частиц;

- мировые константы;
- нарушения симметрии;
- организующие принципы;
- систематические ошибки отбора;
- категории мышления.

На страницах этой книги мы подробно поговорим о природе и удельном весе каждого из названных факторов в процессе построения окончательной картины мира. Но прежде чем отправиться по восьмеричному пути, обратимся к истокам, оглянемся на некоторые из ранних "теорий всего" и посмотрим, какие мотивы учений-предтеч дожили до наших дней и послужили толчком к научным поискам современников.

Мифы

Когда я был младенцем, то по-младенчески говорил, по-младенчески мыслил, по-младенчески рассуждал; а как стал мужем, то оставил младенческое.

Апостол Павел

Если покопаться в древних мифах, рассказывающих о сотворении мира и судьбах его обитателей, складывается ошеломляющее впечатление, что погружаешься в готовую "теорию всего". Вокруг царит законченность, уверенность, определенность. Есть место для каждой вещи, и каждая вещь находится на своем месте. Ничто не происходит случайно. Нет ничего непонятного или неизвестного. Нет места ни прогрессу, ни сомнениям. Все сущее сплетено в единый гобелен, где все ясно и понятно. Эти древние мифы и были первыми "теориями всего".

Кстати, нас не должно вводить в заблуждение современное толкование термина "миф". Когда обещания и уверения политического деятеля называют "мифическими", под этим понимается что-то лживое, недостоверное, не заслуживающее доверия. Кроме того, нам свойственно путать мифы с легендами, сказками и прочими формами фантастической или

основанной на досужем воображении литературы. Поступая таким образом, мы утрачиваем целый смысловой слой, критически важный с точки зрения нашего научного поиска. Миф – это фундаментальная история. Человек, пересказывавший мифы, служил лишь наивным посредником, который доносил содержащийся в мифах глубинный смысл слушателям, позволяя тем понять причины существующего порядка вещей. Изучая мифологию того или иного народа, мы, в отличие от древних слушателей, вряд ли узнаем что-то очень интересное насчет происхождения Вселенной или человечества; в наших глазах мифология лишь очерчивает кругозор и силу воображения авторов мифов. Мы можем узнать, о чем думали эти люди, насколько проникали в суть явлений, которые представлялись достаточно важными, чтобы искать им объяснения, и до какой степени они воспринимали окружающий мир как единое целое. Но в тот самый момент, когда мы начинаем задаваться вопросами, что означают те или иные детали мифа, мы утрачиваем ту непосредственность восприятия, которая была присуща первобытным слушателям.

Это как спрашивать о сакральном смысле "Красной Шапочки". Ребенок не задаст такой вопрос. Тот, кто интересуется подобным, уже не ребенок. Как и сказки, мифы постигаются одновременно на многих бессознательных уровнях. Слишком конкретный и придирчивый анализ содержащихся в мифе идей разрушит многослойность смыслов и ослабит силу воздействия мифа на слушателей. Мифы не сочиняют специально, на основе собранных данных или в ответ на возникающие проблемы. Они рождаются как антидот к возникающему у людей ощущению собственной незначительности перед лицом явлений, которые недоступны их пониманию.

Современные попытки собрать все сущее в единую и всеобъемлющую картину мира отличаются от древнейших. В те времена признаком успешности "теорий всего" была широта охвата рассматриваемых явлений. Для нас же важна еще и глубина проникновения. Если мы вознамеримся объяснить окружающий мир при помощи системы взглядов, построенной на предположении, что весь мир был сотворен 100 лет назад со всеми уже готовыми сложнейшими компонентами, характеристики которых указывают на то, что они существуют многие тысячелетия, тогда наше "объяснение" действительно будет иметь необходимую широту охвата, однако окажется лишенным какой бы то ни было глубины. Мы не сможем извлечь из такого построения ничего сверх того, что сами в него вложили. В XIX веке сходную теорию предложил Филип Госсе. В попытке сгладить противоречия между геологическими свидетельствами того, что Земля существует миллионы лет,

и царившим в обществе убеждением, что акт творения имел место лишь несколько тысяч лет назад, Госсе предположил, что в процессе сотворения мира камни уже были созданы с отпечатками доисторических животных, мнимо свидетельствовавшими о якобы имевших место ранних стадиях эволюции. С другой стороны, глубокая теория способна объяснить широкий ряд феноменов при минимальной роли исходных вводимых допущений в итоговом результате. Степень того или иного последствия может быть охарактеризована теми усилиями, которые нужно потратить, чтобы пройти по кратчайшей цепочке логических рассуждений от исходной посылки до вывода (иначе говоря, количеством энергии, затраченной компьютером в процессе расчета ответа с момента постановки задачи).

Слабость мифологических "теорий всего" существенным образом сказалась на их структуре и эволюции. Таким системам недостает прочности, и они быстро рушатся при любом потрясении. Вследствие этого каждый новый факт, обнаруживаемый в процессе жизнедеятельности, требует вплетения в уже существующую ткань теории новых объясняющих этот факт деталей. Наиболее явно это проявляется в изобилии богов, свойственном большинству древних культур. Всякая короткая цепочка объяснений ("Почему идет дождь?" – "Потому что бог дождя плачет") имеет свойство заканчиваться божеством. Любая попытка окончательного объяснения – будь оно мифологическое или математическое – должна иметь психологически приемлемый финал. В большинстве мифологических историй приемлемым финалом, отвечающим на ряд вопросов "почему", является божество. Чем более произвольными и отрешенными друг от друга являются объяснения различных явлений природы, тем больше богов нужно такой мифологии.

В первоначальной форме каждый миф, по-видимому, имеет очень простую структуру и служит ответом на какой-то один вопрос. Однако с течением времени миф разрастается, становится все более сложным и громоздким, и воедино его части связываются лишь законами поэтической формы. Новая фантазия – новое божество; и так один за другим добавляются новые элементы в эту мозаику, в это лоскутное шитье мифа. Причины и следствия продолжают добавляться и умножаться, и никто не заботится об их "инвентаризации". Важно лишь, чтобы они складывались в более-менее гармоничное целое. Сегодня подобные методы объяснения сути вещей неприемлемы. Мало охватить все сущее, чтобы претендовать на полный и окончательный ответ.

Неразборчивое приумножение божеств порождает и конфликт законотворчества в мире природы. Образ некой верховной сущности, ниспосылающей миру универсальные законы, вырисовывается с большим трудом. Даже если обратить взор на сравнительно хорошо проработанный и упорядоченный пантеон греческих богов, наличие в нем всемогущего космического законодателя не представляется таким уж очевидным. Те или иные события происходят вследствие торга, споров, хитрости, обмана, а не в силу некоего верховного декрета. Творение осуществляется коллегиально, решениями соответствующих "комитетов" и "комиссий", а не указами самодержца. И поскольку каждое событие рождается из множества мотивов и причин, это в конечном счете ведет к умножению числа объяснений одного и того же феномена, что лишь усложняет дело. С течением времени ситуация только усугубляется, поскольку нет никаких оснований и инструментов для движения к простоте. Современная методика научного объяснения больше ценит глубину, нежели широту охвата, увязывая различные причины между собой и стараясь найти единство в кажущемся многообразии. Взвешенная и узконаправленная теория постепенно может стать – и реально становится – глубокой и широкой. А вот мелкое, поверхностное построение, трактующее даже множество явлений, глубоким никогда не станет.

Не совсем ясно, как следует относиться к создателям первых мифологических "теорий всего". Можно предположить, что они были реалистами, и именно поэтому предлагаемые ими картины мира выглядят такими, в худшем случае, безумными, а в лучшем – ошибочными. Но, несмотря на то что большинство слушателей в те времена воспринимали эти истории совершенно буквально (более того, и сегодня многие люди придерживаются схожих взглядов), вполне можно предположить, что были и те, кто воспринимал подобные рассказы как отражение какой-то недостижимой, непознаваемой истины, а также циники, которые видели в мифах полезные с практической точки басни или инструменты для поддержания статус-кво.

Даже если мы склонны списывать данное мифотворчество на невежество далеких предков, следует всегда помнить о том, что это стремление к полномасштабному и окончательному объяснению всего на свете не угасало в людях на протяжении многих столетий. Самым поразительным примером такого рода являются средневековые схоласты, стремившиеся кодифицировать и упорядочить все, что мы знаем и вообще можем знать о небе и земле. Такие великие кодексы, как "Суммы" Фомы Аквинского и "Божественная комедия" Данте, представляют собой попытки

объединить всю существующую массу знаний. Для каждой вещи есть свое место, у каждой – свой смысл. В средневековой системе мироздания было даже слишком тесно и душно, считает К. С. Льюис:

> "Человеческому воображению редко приходилось иметь дело с объектом настолько упорядоченным, как средневековый космос. Для нас, познавших красоту и свободу романтизма, там все слишком зарегулировано – до такой степени, что, несмотря на огромные размеры этой Вселенной, в ней начинаешь испытывать клаустрофобию. Там нет ничего расплывчатого и неопределенного. Там нет ничего нераскрытого. Там нет никаких полутонов. И оттуда уже никогда никому не выбраться".

Подобно тому как стремление к космологическому единству и полноте привело первобытные народы к созданию сложнейшей лоскутной системы мифов и божеств, призванных обеспечить каждой вещи свое место в мироздании, желание средневековых схоластов гармонично соединить всю сумму знаний в "теорию всего" тоже привело к невообразимому усложнению их системы взглядов. Там, где первобытный разум строил всеобъемлющую картину мира силой фантазии, а потом был вынужден соединять все воображаемые объяснения в нечто цельное, средневековый мыслитель обращался за помощью не к своим представлениям, а к существующим книгам и авторитетам. В глазах схоласта письменные труды древних философов были настолько же неоспоримыми и непреложными, насколько для современных физиков таковыми являются экспериментальные свидетельства. Но достаточно бросить взгляд на все эти толстенные тома древних письменных источников, чтобы понять, насколько огромную работу взвалили на свои плечи средневековые ученые. Впрочем, и в XX веке не обошлось без таких попыток. Вспомним хотя бы проблему обоснования и значения математики, которая вызывала столь бурные дискуссии на рубеже XIX и XX веков. Формалисты пытались защитить математику от парадоксов, предложив определять ее как итоговую сумму всех логических умозаключений, которые можно сделать из всех возможных исходных посылов при помощи всех возможных правил вывода. Как мы увидим в одной из следующих глав, доказано, что невозможно перебрать все возможные следствия, вытекающие из математических постулатов. Стремление к полноте не смогло реализоваться даже здесь, в самой формализованной и контролируемой человеком системе знаний, коей является математика. Это современное стремление к полноте идет рука об руку с желанием сформировать единую картину мира. Если древние

довольствовались придумыванием множества мелких божков, которые вводились в сюжет мифа, чтобы объяснить происхождение каких-то конкретных вещей и явлений, но зачастую конфликтовали между собой, наследием великих монотеистических религий стала вера в возможность единого всеобъемлющего объяснения Вселенной. Подобная вера имеет глубокие корни. Любое описание Вселенной – разрозненное и разделенное на фрагменты – побудило бы нас продолжать поиски очередного принципа, который связал бы части с единым источником. По существу, мы видим религиозную мотивацию. Ведь нет логических оснований полагать, что Вселенная не должна содержать в себе иррациональные или произвольные элементы, которые никак не связаны со всем остальным.

Мифы о сотворении мира

Приходится признать, что в плане единства и гармонии картины мира мифическое объяснение дает большую фору научному. Дело в том, что для науки поиск полного и окончательного объяснения Вселенной не является главной целью... Наука довольствуется частичными и условными ответами, тогда как другие системы объяснения – магические, мифические или религиозные – отличаются большей полнотой. Они применимы ко всем областям знаний. Они отвечают на все вопросы. Они способны объяснить происхождение, текущее состояние и даже будущую эволюцию Вселенной.

Франсуа Жакоб

Различные мифологические и научные объяснения всего, что нас окружает, настолько привычны, что современному человеку довольно трудно взглянуть на вещи глазами предков. Для нас их абстрактные идеи стали общим местом. Говорят, что древний человек, пытавшийся объяснить окружающий мир, мог полагаться либо на разум и зрение, либо на веру в духов или некие невидимые сущности. Однако на самом деле это ложная дихотомия. На той примитивной стадии развития какие-то параллели между витающими в голове мыслями и воочию наблюдаемыми во внешнем мире предметами и явлениями сами по себе были актом веры. Безликие и

невидимые силы природы никак нельзя признать легкодоступными для обсуждения или объяснения, не говоря уже об их предсказании. Более того, последствия действия этих сил были зачастую настолько пугающими и разрушительными, что гораздо больше оснований было видеть в них силы враждебные или, хуже того, иррациональное проявление хаоса и тьмы.

Поэтому необходимо снять шоры с глаз, прежде чем мы сможем понять эволюцию идей, касающихся происхождения мира, которые обнаруживаем в мифах и традициях любого народа и культуры. Эти истории нередко истолковываются как иллюстрации невероятного предвидения древними мыслителями некоторых популярных современных идей, таких как возникновение Вселенной из ничего или ее бесконечный возраст. Но к такому сопоставлению воззрений не стоит относиться слишком серьезно. Если сосредоточить внимание на тех моментах древних учений, которые якобы предвосхищают современные взгляды, это приведет лишь к искаженному восприятию прошлого.

Космология тех времен не была научной. Ее задача – не объяснять наблюдения или что-то предсказывать, а скорее соткать смысловой гобелен, в котором его авторы могли рассказать о себе и сопоставить свое существование с тем неизвестным и таинственным, что их окружало. В мифах могла найти оправдание и поддержку организация местного общества, помещенного в контекст истории о происхождении и развитии окружающего мира. Резкий контраст между целями прошлого и настоящего очень хорошо объяснил Фрэнсис Йейтс:

> "Фундаментальное различие между отношением к окружающему мага и ученого заключается в том, что первый хочет вместить мир в себя, стать с ним одним целым, а второй усилием воли стремится к чему-то противоположному: он отрешается от внешнего мира, полностью обезличивает его".

Примитивная вера в порядок и причинно-следственную связь, находящая отражение в мифах, – это еще и вера в какую-то первопричину для существования всего сущего – исходную точку, которая как раз и требует с трепетом относиться к силам природы, держащим в руках жизнь и смерть. Если мировоззрение предполагает персонификацию природных сил, то поиск причины сводится к вопросу, кто за что отвечает и кто в чем виноват. Подобные обобщенные допущения сами по себе никоим образом не приводят к уникальному своду идей о том, каким образом возникла Вселенная. Если проштудировать все известные мифы, касающиеся ее

происхождения, можно подивиться тому, как мало в них космогонических идей. Изредка мы обнаруживаем представления о возникновении мира из ничего, но можно встретить и идеи о реструктуризации сущего из хаоса. Зачастую этого вполне достаточно, чтобы сочинить историю, объясняющую порядок вещей, наблюдаемый нами. Подробно объяснять, что было до того, как сформировался нынешний мир, или во что он превратится, – не есть задача мифа. Иногда мы обнаруживаем приверженность концепции циклического развертывания истории, очевидным образом связанной с суточными и сезонными циклами, наблюдаемыми в природе, или идее мира, у которого не было начала. Еще встречаются живописные истории происхождения сущего из "космического яйца" или от двух мировых родителей. В этот же ряд можно поставить мифы о рождении мира из первобытной матки или о том, как он был выловлен из первозданных вод хаоса героем-рыбаком. Наконец, в сказаниях присутствует некая титаническая фигура, вступившая в борьбу с силами хаоса и тьмы, а из героической! победы света над тьмой и рождается наш Космос.

Все эти формулы стремятся установить какую-то первопричину, которая сама по себе в объяснениях не нуждается. Она проста в том смысле, что единична, тогда как мир феноменов ошеломляюще многообразен. Эти фантастические спекуляции отличаются от нынешних подходов прежде всего тем, что их конечная цель творения переплетается с мотивацией или первоначальным планом творения. Но один аспект все же объединяет древние мифы с современными попытками познать Вселенную. Это поиск. Его сегодняшняя цель – не просто понять структуру всех форм материи, окружающей нас, а объяснить, зачем вообще она нужна, и показать, что причины существования данной конкретной структуры физической Вселенной доступны нашему познанию. Говоря словами Эйнштейна, "мог ли Бог сотворить этот мир иначе, то есть оставляет ли необходимость простоты логической последовательности место вообще какой-либо свободе".

Алгоритмическая сжимаемость

Иррациональность есть квадратный корень из всякого зла.

Дуглас Хофштадтер

Цель науки – объяснить многообразие, но она не может основываться на одних лишь наблюдениях. Последние предполагают сбор информации об окружающем мире. Еще один аспект – проверка предсказаний о том, как мир отреагирует на новые обстоятельства. Однако между этими двумя процедурами как раз и заключена сущность процесса. Наука призвана спрессовать огромную массу фактов в некую удобоваримую форму за счет выявления определенных закономерностей. Обнаружение повторяющегося мотива позволяет заменить информационное содержание наблюдаемой цепочки событий лаконичной формулой, которая имеет такое же (или почти такое же) фактологическое наполнение. Применяя этот научный метод и постепенно совершенствуя его, мы учимся использовать все более сложные шаблоны, новые формы симметрии и типы алгоритмов, позволяющие сжимать огромные объемы наблюдаемых данных в компактные максимы. Ньютон обнаружил, что вся информация, которую он смог собрать в отношении движения как небесных, так и земных тел, легко умещается в набор простых правил, коими являются "три закона движения", как называл их сам Ньютон, и закон всемирного тяготения.

Чтобы лучше разобраться в этом аспекте науки, рассмотрим его на конкретном примере. Предположим, у нас есть некая последовательность символов. Это необязательно должны быть цифры, но ради наглядности договоримся, что речь идет именно о числовой последовательности. Если она случайна, то ее невозможно описать в какой-то более короткой форме, чем она есть. Но если речь идет о неслучайной последовательности, обязательно должно существовать некое сокращенное описание. Так, например, последовательность 2, 4, 6, 8... и так до бесконечности более лаконично можно описать, сказав, что перед нами перечень четных положительных чисел. Ясно, что речь не идет о выбираемых наугад числах.

Компьютеру можно задать коротенькую программу, чтобы он выдал всю эту последовательность.

Как правило, чем короче числовая последовательность, тем меньше в ней случайностей. Если же сокращенное описание в принципе невозможно, мы имеем дело с последовательностью, где числа расставлены совершенно случайным образом, без какой-либо закономерности, которую можно было бы использовать для более компактной кодировки данного объема информации. Любой символический ряд, который можно представить в укороченной форме, называется *алгоритмически сжимаемым*.

С этой точки зрения науку можно рассматривать как методику поиска алгоритмических сжатий. Мы выписываем последовательности наблюдаемых данных. Потом пытаемся сформулировать алгоритмы, позволяющие компактно описать информацию, содержащуюся в этих сведениях. Далее мы проверяем правильность гипотетического сокращения, пытаясь с его помощью предсказать следующий член последовательности. Затем эти предсказания сравниваются с реальным ходом событий. Без такого алгоритмического сжатия данных наука была бы чем-то вроде бездумного коллекционирования марок – "ученые" без разбора накапливали бы всю поступающую информацию. Наука основывается на том убеждении, что Вселенная алгоритмически сжимаема, и современные поиски "теории всего" как раз служат высшим проявлением этой убежденности и веры в то, что человеку под силу в завершенной компактной форме описать логику, обусловливающую все наблюдаемые свойства Вселенной.

Эти размышления о сжимаемости Вселенной подводят нас к пониманию практической роли математики в естествознании. Физические теории всегда описываются на языке математики, и физиков, похоже, интересуют только такие "теории всего", которые поддаются математическому изложению. Это что-то говорит о природе нашей Вселенной или природе математики? Последнюю в этом контексте проще всего представить, как каталог всевозможных шаблонов и закономерностей. Некоторые визуально красивы и используются в декоративных целях; есть модели описания развития событий во времени или в последовательности причинно-следственных связей. Одни описываются сугубо в абстрактных терминах, другие нагляднее проявляются на бумаге или в камне. Когда смотришь на математику под таким углом, становится понятно, что объяснить мир без математики невозможно. Мы сами не существовали бы, если бы во Вселенной не было определенных закономерностей и порядка.

Он является неизбежностью, и именно его описание (и всего прочего, что мы только можем вообразить) мы и называем математикой. Поэтому нет ничего таинственного в том, что мир представляется набором математических формул. Удивляться приходится скорее тому, что алгоритмы оказываются сравнительно несложными и исключительно практичными. Легко представить мир, в котором закономерности, скрывающиеся за феноменами, настолько сложны, что их невозможно даже приблизительно описать с помощью сравнительно простой совокупности действий. Такая Вселенная формально тоже была бы математической, но последняя в этом случае оказалась бы совершенно неудобоваримой, а потому почти бесполезной с практической точки зрения. Мы могли бы доказывать всякие "теоремы существования", но у нас не было бы возможности детально предсказывать будущее с помощью математики – так, как это делают, скажем, при подготовке космических полетов НАСА. Глядя на вещи под таким углом, мы должны признать, что в математике и во Вселенной заключена великая тайна. Почему до сих пор мир удавалось описывать математически? Очень простые для понимания модели позволяют объяснять и понимать огромную часть Вселенной. Можно сказать, что она чрезвычайно сжимаема в алгоритмическом смысле. Огромное количество фактов, какими бы сложными они ни казались, можно свести к очень простым моделям, описываемым короткими формулами и уравнениями. В определенном смысле правомочно утверждать, что поиск "теории всего" опирается на веру в то, что Вселенную можно "сжать" до основания и фундаментальные закономерности, придавшие ей форму и содержание, тоже окажутся очень "простыми" в том смысле, что нам вполне под силу открыть их и понять. Мы исходим из того, что потенциала человеческого разума и новейших технологий окажется достаточно для того, чтобы понять и отыскать эти фундаментальные закономерности. При прочих равных условиях двумя наиболее вероятными положениями представляются следующие: наш разум либо может решить эту сложную задачу, либо не в состоянии справиться с ней. Допущение, что мы почти способны понять фундаментальные законы Вселенной с использованием методов современной математики, было бы чрезвычайно подозрительным: как получилось, что сложность человеческого разума так близка к сложности Вселенной?

Мозг является самым эффективным инструментом алгоритмического сжатия, позволяющим нам сокращать информационное содержание реальности. Лучшего инструмента такого рода мы еще во всей Вселенной не встречали. Он сжимает сложные последовательности сенсорных данных в

простые и короткие модели, что делает возможным само существование мышления и памяти. Естественные ограничения, наложенные природой на остроту нашего зрения и слуха, защищают нас от информационной перегрузки. Благодаря этим ограничениям мозг получает ровно столько информации, сколько он в состоянии обработать. Если бы мы могли видеть материю насквозь, вплоть до субатомных частиц, для обработки таких объемов зрительной информации нам пришлось бы иметь мозг колоссальных размеров. Необходимо было бы изрядно повысить скорость обработки информации, чтобы мы успевали достаточно быстро реагировать на поступающие сигналы о разного рода опасностях. Об этом мы подробнее поговорим в последней главе книги, где речь пойдет о математических аспектах мышления.

Такой взгляд на процесс научного исследования как на поиск алгоритмических сжатий очень удобен и привлекателен, но во многих отношениях его приходится признать слишком упрощенным и наивным. Далее мы узнаем, в чем тут дело, и приступим к изучению уже упоминавшихся восьми необходимых ингредиентов познания физического мира, чтобы понять, какую роль каждый из факторов играет в современном научном поиске всеобъемлющей картины мира. Начнем с самых древних понятий – законов природы.

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ

Поищите другой мир, который смотрит на этот...

Генри Воган

Наследие закона

Мечтая, мы музыку пишем,
В ручей одинокий глядим,
Его откровения слышим,
Без цели моря бороздим;
Для этого мира чужие,
От блеклого света луны
Уходим, но преображаем
Всегда его все-таки мы.

Артур О'Шонесси*

Наше представление о законах природы формировалось веками и сплетено из множества нитей. На первобытные общества и группы наибольшее впечатление производили разного рода природные катаклизмы: стихийные бедствия, чума, мор. С течением времени внимание людей переключилось с потрясений, которые невозможно предвидеть, на изучение законов природы, чтобы плодотворно использовать полученные знания в своих интересах. За кажущейся бессвязностью разнообразных явлений люди заметили определенные закономерности. Стихийные

* Перевод С. Злотина.

бедствия стали восприниматься не как правило, присущее естественному порядку вещей, а скорее как исключение. За различными гранями мироздания начала угадываться определенная степень упорядоченности, организованности, аналогичной той, что стояла за целенаправленным и методичным вмешательством человека в природу.

Ранние представления о мировом устройстве были окрашены в социальные и религиозные тона. Вариантов существовало множество. Одни считали мир организмом, который растет и созревает, пока его жизнь не достигнет кульминации, связанной с каким-то великим предназначением. Все живое, подчиняясь врожденному императиву, пытается отыскать предначертанный путь. При этом оно не следует законам, диктуемым откуда-то извне, но прислушивается к собственным имманентным качествам. Смысл вещей проявляется не в настоящем состоянии и не в прошлом, но в самом конце, в кульминационные моменты существования. Другие воспринимали мир как космический полис, управляемый трансцендентными законами и правилами, установленными верховной сущностью. Город этот окружен высокими стенами, и порядок в нем поддерживается для нашего же блага. За пределами полиса царят хаос и зло. Третьи представляли совсем другую картину. Никакого внешнего законодателя нет. В нем нет необходимости. Все обитатели мира гармонично сотрудничают ради общего блага, по взаимному согласию и без всякого принуждения. Мировой порядок уподоблялся муравейнику, где каждый индивид играет свою роль в интересах гармоничного и самоорганизующегося целого. Действия каждого являются спонтанной реакцией на потребности системы в целом, а вовсе не результатом лишенных гибкости вечных и неизменных законов природы.

Различные современные культуры в своих представлениях о естественных законах находятся под влиянием соответствующего религиозного наследия. В западной иудео-христианской традиции огромная роль отводится божественному законодателю. Законы природы написаны под диктовку трансцендентного Бога. Они предполагают несгибаемую веру в существование некоего изначального порядка вещей. Исследование природы видится как сугубо секулярная деятельность. Божества объявлены вне закона, что устраняет потенциальные конфликты в сфере вселенского законодательства. Восточные культуры (типа древнекитайской) рисуют картину более либеральную: Природа стремится к гармоничному равновесию всех ее составляющих, которые, взаимодействуя между собой, создают целое, превосходящее сумму частей.

Нетрудно понять, почему так затруднен научный прогресс в условиях восточного холистического мировоззрения. Оно отрицает саму мысль о том, что можно изучать части Вселенной в отрыве от всего остального, *анализировать* окружающий мир, познавать отдельные части вне контекста целого. Если говорить языком современной науки, на Западе господствует взгляд на природу как на феномен линейный, где каждое явление, наблюдаемое в данное время в данном месте, обусловлено исключительно теми событиями, которые произошли несколько ранее где-то неподалеку. Холистический взгляд па природу, присущий народам Востока, такую примитивную линейность отвергает, поэтому в их космологии доминируют нелинейные возмущения, которые, взаимодействуя между собой, формируют чрезвычайно сложное целое. Не то чтобы восточный взгляд был неверен. Он попросту слишком опережал свое время. Только совсем недавно, вооружившись возможностями компьютерной графики, ученые стали описывать внутренне сложные нелинейные системы. Успешное исследование законов природы должно начинаться с изучения простых проблем; только так можно рассчитывать на дальнейшие успехи в изучении сложных структур, требующих холистического подхода.

Рисуя объемную картину взаимосвязей между религиозными воззрениями и натурфилософией, необходимо проявлять осторожность. Есть апологеты, утверждающие, что современная наука выросла из западной христианской религиозной культуры и вообще существует благодаря ей. Без сомнения, в этом мнении, если его правильно интерпретировать, есть зерно истины, но принимать его безоговорочно было бы такой же ошибкой, как и соглашаться с широко распространенным убеждением, что между наукой и религией на протяжении всей истории велась непримиримая война как между силами света и тьмы. Монотеистическая основа для концепции универсальных физических законов содержит в себе элемент истины, и это неотделимо от того факта, что состояние современной науки – следствие влияния тех же самых событий, которые повлияли и на историю религии. Кроме того, многие великие ученые были людьми верующими, поэтому старались обосновывать свои научные открытия с религиозных позиций. Эти факты невозможно отрицать, но они не доказывают, что современная наука обязана христианскому прошлому, без которого она не могла бы существовать. Это слишком вольное допущение в цепочке причинно-следственных связей. Тем не менее нас пытаются убедить в том, что наука вообще и концепция всемирных законов в частности являются логическим продолжением определенного ряда религиозных верований, а не просто

служили началом их осмысления. В религиозных ученых – Бойль, Ньютон или Максвелл – недостатка не было, но все они старались всячески подчеркивать те аспекты своих религиозных воззрений, которые хорошо согласовывались с их научными взглядами и открытиями. Они довольствовались тем, что их научная деятельность не противоречила основным догмам христианского мировоззрения в те времена, когда религия играла более важную роль в жизни людей, нежели сегодня. Однако в христианской доктрине всегда были положения, которые с гораздо меньшей очевидностью согласовывались с научными теориями и значение которых те же самые ученые на подсознательном уровне предпочитали преуменьшать или попросту не замечать. С другой стороны, среди богословов и философов всегда хватало тех, кто считал науку занятием постыдно-материалистическим и даже нечестивым. Кроме того, способности, необходимые для научной деятельности, отнюдь нельзя считать порождением исключительно иудео-христианского (как и любого другого) наследия. Верить в то, что наука является прямым и необходимым продолжением исторически предшествовавших ей религиозных учений, – значит быть приверженцем детерминистического взгляда на историю как прямолинейную цепочку уникальных причинно-следственных связей. Реальный мир гораздо сложнее подобных моделей. Это запутанный клубок множества нитей без начала и конца.

Поиски единства

Человеку не должно соединять то, что разделено Богом.

Вольфганг Паули

По мере того как мы становились более требовательными к объяснениям и образам, масштабы картины мира, которую необходимо трактовать, значительно возросли по сравнению с тем, с чем приходилось сталкиваться нашим предшественникам. Рисунок становится все более сложным, поэтому физики специализируются на разных его аспектах, которые тоже делятся на удобоваримые части-задачи. Каждый выдающийся физик добился успеха в своей области благодаря построению

математических моделей и снабдил нас эффективными описаниями различных типов взаимодействия между частицами материи и света. Самым поразительным аспектом этих теорий – помимо их громкого успеха – является то, что до недавнего времени они четко различались по форме и содержанию, словно боязливо сторонились друг друга, неся отпечаток какой-то странной паранойи, заложенной природой, что шло вразрез с нашими представлениями о единстве мира.

В истории очень редко встречались амбициозные ученые, пытавшиеся построить теорию, соединявшую существующие фундаментальные взаимодействия в одну гармоничную систему, из которой в дальнейшем явлено было бы все сущее. Одним из первых таких мыслителей был Бернхард Риман, математик XIX века, систематически изучавший неевклидову геометрию. Он предложил разработать единую математическую теорию физики и в письме к Рихарду Дедекинду выразил убежденность:

> "Можно создать полностью самодостаточную математическую теорию, описывающую как элементарные законы, применимые к различным дискретным ситуациям, так и процессы, происходящие в непрерывно заполненном пространстве, независимо от того, идет речь о гравитации, электричестве, магнетизме или тепловом равновесии".

В XX веке наиболее известные попытки создания единых теорий были предприняты Эддингтоном и Эйнштейном. Причин у постигших их неудач много. В то время знание мира элементарных частиц было совершенно недостаточным, так что Эддингтон и Эйнштейн даже не знали, что, собственно, они должны объединить, не говоря уже о том, как это сделать. Однако огонь, который они зажгли, продолжал тихонько гореть на заднем плане, зачастую становясь почти незаметным среди фейерверков, устраивавшихся в честь очередных открытий в разных областях естествознания. Но в последнее время это пламя стремительно разгорается благодаря попыткам физиков-теоретиков пролить свет на устройство и происхождение Вселенной. Если в прошлом на "объединителей" смотрели как на чудаков-одиночек, отдавая дань признательности за вклад в развитие соответствующих физических дисциплин, то объединители конца XX века принадлежат к научному мейнстриму. В их число постоянно вливаются самые одаренные студенты и выпускники вузов. Это важная черта, отличающая мир физики 1980-х от того, что было раньше.

Нынешнее поколение кандидатов на титул авторов теории всего" питает надежду заключить все законы природы в достаточно простую оболочку. И сам факт поиска говорит много важного о наших ожиданиях, постоянно подпитываемых жизненным опытом человечества, унаследованными религиозными убеждениями и самим желанием понять смысл существования. Монотеистические традиции не дают нам усомниться о том, что Вселенная едина. Ее законы одинаково действуют на всех уровнях бытия. Она не является ни порождением битвы титанов, стремящихся подчинить природу вещей своей произвольной воле, ни компромиссным продуктом некоего решения комиссии богов. Западная религиозная традиция также поддерживает в нас убеждение, что мир логичен и не подчиняется законам, навязанным извне декретам трансцендентного божества. Впрочем, нам присущи и предрассудки, корни которых во множестве традиций. Одни придерживаются императива древних греков, считавших, что структура Вселенной является необходимой и непререкаемой истиной, которая такова, какова есть, и не могла быть иной. Другие считают, что бытие Вселенной определяет случай. Здесь интересно вспомнить мнение Чарльза Бэббиджа, эксцентричного изобретателя счетных машин, который много времени и сил отдал изучению законов природы. Он был первым, кто еще в XIX веке уподобил Вселенную компьютеру (если изъясняться современным языком), в программе которого прописаны матрицы всех явлений. Впоследствии этот образ навел Бэббиджа на мысль, что кодировка могла быть и совсем другой:

> "Чем больше человек интересуется законами, регулирующими материальный мир, тем больше он убеждается, что все многообразие форм является результатом действия нескольких простых принципов, которые сводятся – с ускоряющей силой – к некоему более широкому закону, и ему, вероятно, подчиняется вся материя. При всей возможной простоте последнего нужно помнить, что он – один из бесконечного числа несложных принципов и каждый из них вел бы к последствиям не менее масштабным, нежели существующий закон. Следовательно, Творец, выбравший нечто одно из множества, должен был предвидеть последствия все остальных законов".

Наше влечение к качеству, которое мы называем "красотой" и связываем его с наличием внутреннего единства и гармонии, побуждает нас ожидать от Вселенной тех же проявлений. От физиков часто можно услышать, что идеи или теории они называют красивыми либо элегантными. Более того, это эстетическое качество становится для многих из них, как,

например, для Дирака*, указателем направления поиска или даже необходимым критерием правильных математических описаний Вселенной.

Подобный императив Дирака в глазах любого ученого-гуманитария может выглядеть эксцентричной причудой, особенно когда он видит, насколько беспомощными оказываются физики со всем своим могучим математическим аппаратом в сферах, выходящих за рамки их научной дисциплины. Ведь физики привыкли иметь дело с идеальной симметрией и фундаментальными законами природы. Эта склонность побуждает искать соразмереность и математическую элегантность во всем, к чему обращается взор. Но живой мир – не мраморный дворец. Он является сумбурным продуктом естественного отбора и конкуренции между многими взаимодействующими факторами и зачастую лишен всякой элегантности и симметрии.

Руджер Бошкович

Дорогой читатель, вы держите перед собой "Теорию натуральной философии", в которой приведены к единому закону все силы, существующие в природе.

Руджер Бошкович

За последнее столетие наши представления о физическом мире настолько расширились, что современному физику уже непросто понять логику ученых прошлых веков. Ньютону была неведома классификация различных физических сил. О радиоактивности и ядерных силах никто не слыхивал; электричество и магнетизм воспринимались как совершенно разные, не связанные между собой феномены. Земные и небесные эффекты гравитации тоже считались концептуально различными, пока Ньютон не объединил их. Этот ученый в целом упростил картину мира, объяснив

* Когда его спросили, что он называет красотой физико-математической теории, Дирак ответил, что, если бы вопрошающий был математиком, ему не пришлось бы это объяснять, но, если он не математик, нет никакой возможности его в этом убедить.

гравитационные феномены в рамках сравнительно простого закона тяготения, где все сводилось к действию единой силы притяжения, возникающей между всеми телами. Несмотря на успехи, достигнутые в этом направлении, а также в областях термодинамики и оптики, где Ньютону также удалось логически упростить и упорядочить огромное количество несистематизированных наблюдений, он прекрасно понимал, что оставалось еще множество вопросов, окутанных тайной. Ученый предполагал, что в природе должны существовать и другие силы – "очень сильное притяжение", – которые удерживают в целостности материальные тела, не позволяя им рассыпаться на части, но продвинуться в этом направлении не смог.

Одной из самых замечательных и несправедливо забытых фигур в истории современной европейской науки является Руджер Бошкович. Далматинский иезуит, поэт и советник папы по вопросам архитектуры, дипломат-космополит и делец, светский лев и богослов, доверенное лицо государей и член Лондонского королевского общества, но превыше всего математик и естествовед, Бошкович был рьяным приверженцем Ньютона, первым выдвинувшим действительно научную версию "теории всего". Его самый известный труд – "Теория натуральной философии" – был впервые опубликован в Вене в 1758 году. Затем последовало несколько переизданий, и кульминацией стало исправленное и дополненное венецианское издание 1763 года. Его влияние было весьма значительным, особенно в Великобритании, где очень высоко об этом труде отозвались Фарадей, Максвелл и Кельвин.

Бошкович стремился расширить и развить общую ньютоновскую картину мира сразу по нескольким направлениям. В частности, он попытался "вывести все наблюдаемые феномены из единого закона". Для этого Бошкович ввел в оборот несколько новых понятий, которыми ученые пользуются по сей день. Он придерживался атомистической точки зрения, утверждая, что весь мир состоит из идентичных элементарных частиц, и постарался показать, что существование в природе крупных объектов является следствием того, как их элементарные составляющие взаимодействуют между собой. Итоговые структуры – состояния равновесия между силами притяжения и отталкивания. Это была первая серьезная попытка понять принципы существования твердых тел в природе. Бошкович видел, что одного ньютоновского закона тяготения недостаточно, чтобы объяснить существование тел определенных размеров и форм. Закон обратных квадратов, сформулированный Ньютоном, не выделял какие-то особые масштабы расстояний, на которых гравитационное взаимодействие

наиболее выражено, и имел бесконечный радиус действия. А присутствие в природе объектов конечных размеров могло быть объяснено только за счет баланса между силами притяжения и отталкивания.

Бошкович предложил вниманию ученого сообщества единую силу, которая включала в себя все известные физические эффекты. В этом и заключалась его "Теория", как он сам ее называл. Эта сила подчиняется ньютоновскому закону тяготения на больших расстояниях, вполне согласуясь с наблюдаемым движением Луны. Но на более близких расстояниях сила приобретает поочередно то притягивающий, то отталкивающий характер и поэтому делает возможным существование равновесных структур, размеры которых диктуются масштабом, изначально встроенным в закон. Закон сил, предложенный Бошковичем, наглядно показан на рисунке 2.1. Бошкович придавал особое значение тому факту, что его закон не просто случайным образом вбирает в себя разные силы, но обязательно описывается непрерывной кривой, которая, по его мнению, свидетельствует о единой и всеобъемлющей природе его теории. Помимо наглядной графической иллюстрации, Бошкович также предложил способ представления закона сил при помощи сходящегося математического ряда, члены которого выражались через отрицательные степени расстояний. Этот ряд тем лучше аппроксимирует истинный закон сил, чем больше членов его взять.

В трактате есть множество других новаторских идей, по здесь нас больше всего интересует то обстоятельство, что Бошкович был первым, кто задался целью построить объединенную математическую теорию, описывающую все силы природы, и предложил свое решение проблемы. Его непрерывный закон сил стал первой по-настоящему научной "теорией всего". Возможно, в XVIII веке только человек настолько же широких и космополитических взглядов, как Бошкович, успешно соединявший научную и административную работу и проявивший себя едва ли не во всех областях человеческой деятельности, мог допустить идею, что и природа сама в состоянии объединять великое множество своих феноменов под крышей единого всеобъемлющего закона.

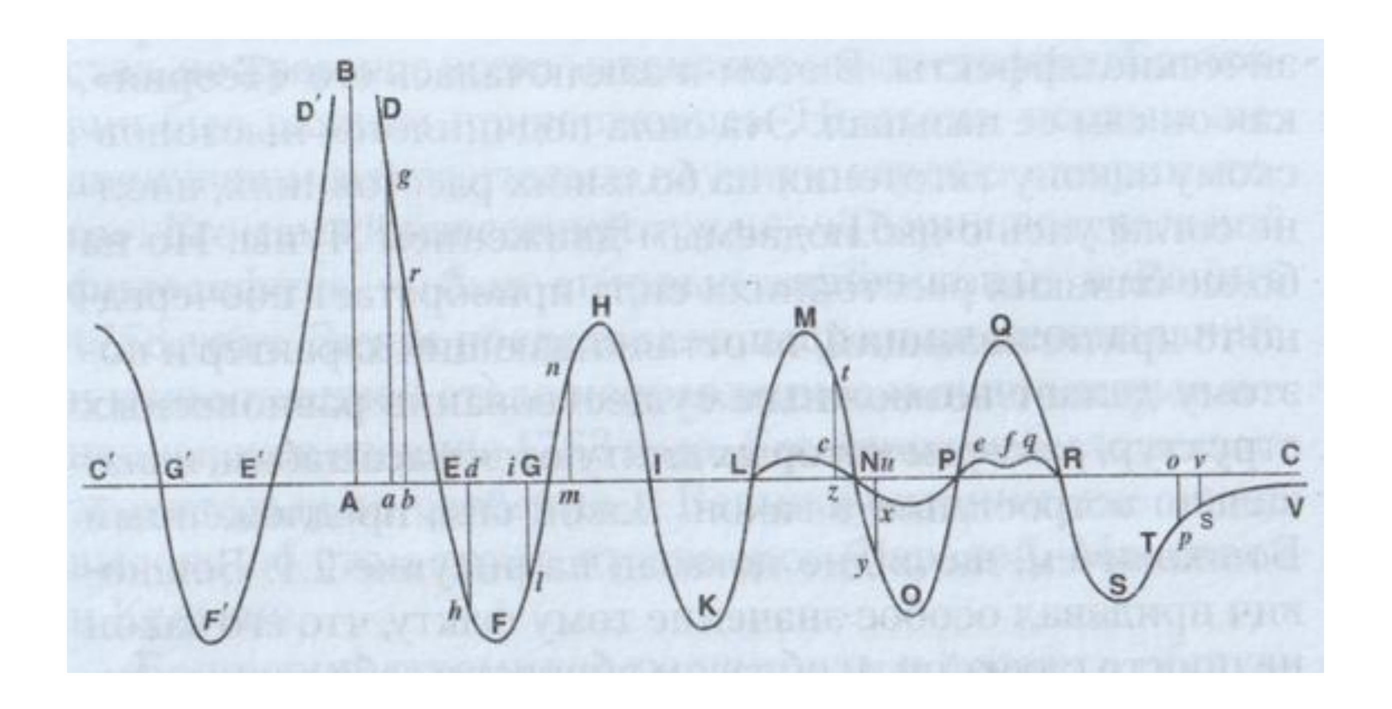


Рисунок 2.1. Оригинальное графическое представление универсального закона сил Бошковича, воспроизводимое из его "Теории натуральной философии", впервые опубликованной в 1758 году. Изменение силы взаимодействия между двумя "материальными точками" по мере изменения расстояния между ними представляется в виде волнистой кривой, проходящей через последовательность точек DFHKMOQSTV. Расстояние между ними определяется по оси абсцисс AC; величина силы меняется вдоль оси ординат AB. Сила имеет характер отталкивания, когда линия графика располагается над осью AC, и характер притяжения, когда график ниже оси. На очень больших расстояниях (в районе точки V и за ней) действие этой силы начинает описываться ньютоновским гравитационным законом обратных квадратов. Отталкивание, возникающее между точками, когда расстояние стремится к нулю, предотвращает коллапс материи в объект нулевого размера. Рассматривая этот график, Бошкович замечает: "Закон такого рода на первый взгляд покажется очень сложным результатом случайного комбинирования нескольких разных законов. Но в реальности он очень простой, и его можно изобразить в виде одной непрерывной кривой... Чтобы убедиться в этом, достаточно одного взгляда".

Симметрии

Но видите ли, я способен поверить во что угодно, даже если не понимаю чего-то. Это дело тренировки.

Лорд Питер Вимси
в романе "Разыскивается труп"
Дороти Сейерс

Для древних греков самым совершенным законом природы была ее статичная гармония. За последние 200 лет концепция физических законов претерпела серьезные изменения, и теперь под ними понимают набор правил, которые объясняют изменение природных объектов в пространстве и времени. Таким образом, зная состояние системы здесь и сейчас, мы пытаемся найти способ предсказывать ее положение в другие моменты времени и в других местах. Но любопытно то, что такие законы преобразований всегда можно переформулировать в виде абсолютно эквивалентных утверждений, декларирующих полную неизменность чего-то. Такие величины называют инвариантами.

В XIX веке математики потратили немало времени п сил на классификацию всевозможных типов преобразований и ассоциируемых с ними инвариантов, причем как в абстрактных, так и в конкретно-практических терминах. Классификация привела к рождению специальной математической дисциплины, которая ныне именуется теорией групп. "Группа" – это совокупность преобразований, обладающая тремя простыми свойствами: возможность отсутствия преобразования; возможность отмены преобразований (или обратных преобразований), восстанавливающих первоначальное состояние; возможность обеспечить при помощи какого-то одного преобразования результат, достигнутый двумя преобразованиями подряд.

Каждый из известных нам наиболее фундаментальных физических законов соответствует тому или иному инварианту, который в свою очередь эквивалентен совокупности преобразований, составляющей группу симметрии. Так, например, закон сохранения энергии эквивалентен инвариантности законов движения относительно перемещения по оси

времени вперед или назад (то есть результаты эксперимента не должны зависеть от времени их проведения при прочих равных условиях); закон сохранения линейного импульса эквивалентен инвариантности законов движения относительно положения лаборатории в пространстве, а закон сохранения углового момента – инвариантности относительно направления лаборатории в пространстве. Другие остающиеся неизменными физические величины, выступающие в роли постоянных интегрирования законов перемен, оказываются эквивалентными иным, менее очевидным инвариантам физических законов. Интересно отметить, что Ньютон не пользовался законом сохранения энергии. Кроме того, при обсуждении теологического значения ньютоновской картины мира отмечалось, что закон сохранения энергии отчасти способствовал росту атеистических настроений среди ученых. Некоторые из них (и сам Ньютон) считали, что представленная динамическая модель известной на то время Вселенной (Солнечной системы) нуждается в охраняющей и регулирующей деснице Провидения. Однако открытые впоследствии законы сохранения как будто указывали на то, что природа обладает встроенным механизмом самосохранения, который не позволяет миру исчезнуть. Получалось, что роль Творца во Вселенной не так велика, как считалось ранее. Именно в этом контексте, имея в виду роль Божества как силы, поддерживающей постоянное движение в Солнечной системе, Лаплас сделал свое знаменитое заявление, что "*мы не нуждаемся в этой гипотезе*". Позже маятник качнулся в обратную сторону, и уже необходимость *нарушить* закон сохранения, чтобы Вселенная могла возникнуть из ничего, убедила многих в неизбежности какого-то сверхъестественного вмешательства. Кроме того, очевидный успех концепции физических законов заставил богословов изменить формулировку телеологического аргумента в пользу существования Бога. М ы пока воздержимся от подробного обсуждения этого вопроса, но в главе 6 все-таки воздадим ему должное.

Даже сегодня многие продолжают придерживаться мнения, что возникновение мира из ничего не может не нарушать базовые законы сохранения, не позволяющие получить что-то из ничего. Тем не менее не существует реальных свидетельств того, что Вселенная в целом обладает ненулевой суммой какой-либо сохраняемой величины. Общая масса-энергия всех частиц, составляющих *конечную* Вселенную, по-видимому, всегда равна по величине общей гравитационной потенциальной энергии этих частиц, но имеет противоположный знак. Таким образом, вся эта масса могла внезапно образоваться без нарушения закона сохранения массы-энергии. Точно так же

нет и доказательств того, что Вселенная обладает ненулевым суммарным вращательным моментом или электрическим зарядом. Вполне может случиться так, что однажды мы обнаружим какой-то другой подчиняющийся законам сохранения атрибут, который имеет ненулевую величину для Вселенной в целом, или получим доказательства того, что она имеет ненулевой суммарный электрический заряд или вращение. Все эти идеи основываются па предположении, что Вселенная имеет границы. Гак ли это, мы не знаем, и в принципе не можем узнать в силу того, что скорость света позволяет нам видеть лишь конечную часть Вселенной. Если она бесконечна, тогда непонятно, как с этим связать сохраняемые величины, и вопрос, могло ли все возникнуть из ничего, не нарушая законы сохранения заряда, вращательного момента и энергии, тем более остается без ответа.

Тот факт, что законы преобразований могут быть сформулированы на языке мировых инвариантов, неизменных при всех возможных преобразованиях и отвечающих определенной изначально заданной конфигурации, вошел в резонанс с ожиданиями физиков относительно наличия в природе симметрии и гармонии. Первая стала доминирующей темой. Физику элементарных частиц в этом смысле можно было бы назвать платоновской. Математики прошлого прилежно разложили по полочкам все типы преобразований, какие только могут существовать, и создали для этой цели специальный раздел математики, получивший название "теория групп". Копаясь в этом калейдоскопе схем, физик, специализирующийся на элементарных частицах, может выделить потенциальные кандидатуры, обладающие симметрией. Системы-кандидаты должны отвечать определенным критериям, гарантирующим, что они смогут объять все необходимые ингредиенты мира элементарных частиц и не имеют каких-то очевидных последствий, идущих вразрез с наблюдаемой реальностью. Затем прошедшие предварительный отбор кандидатуры подвергаются более детальному математическому расчету, в результате чего вырабатывается набор предсказаний на предмет того, как частицы должны взаимодействовать. Таким образом, слепая вера в симметрию служит эффективным методом выбора работоспособных теорий взаимодействия элементарных частиц. Однако эта методика не срабатывает при поиске теорий, потенциально объясняющих устройство таких куда менее фундаментальных систем, как, например, экономика или погода. Главной вотчиной симметрии является невидимый мир мельчайших частиц.

Каждое из четырех фундаментальных взаимодействий аккуратно описывается теорией, базирующейся на допущении инвариантности

соответствующей величины при любых возможных преобразованиях. Поиск объединенной теории осуществляется через попытки собрать конфигурации, не меняющиеся под воздействием каждой из фундаментальных сил, в некое единство, в которое индивидуальные субконфигурации умещаются целиком и совершенно уникальным образом. Работа сложная, и до недавнего времени случались досадные ситуации, которые возникали, когда предполагаемая результирующая инвариантная конфигурация использовалась для расчета наблюдаемых величин. Получавшиеся бесконечные ответы нужно было должным образом интерпретировать, чтобы делать на их основе разумные прогнозы.

До сих пор эта проблема не касалась узкого класса необычных физических теорий, которые были предложены Майклом Грином, Джоном Шварцем и Эдвардом Виттеном. Речь идет о так называемой "теории суперструн". Префикс "супер" здесь восходит к понятию "суперсимметрии", а под ней понимается симметрия, существующая между фермионами и бозонами, совершенно различными классами элементарных частиц. Большинство ситуаций рассматривают отношения между веществом и излучением. Эта идея симметрии существовала задолго до Грина, Шварца и Виттена. Их же заслуга в том, что они сумели соединить явления в мощную концепцию струн.

В ранних теориях самые базовые единицы, из которых сложен мир, рассматривались в виде точечных частиц, не имеющих определенного размера (они могут располагаться где угодно и никак не проявляют свою внутреннюю структуру при бомбардировке другими частицами высоких энергий). Для их описания и объяснения были созданы специальные квантовые теории поля, где самые фундаментальные частицы описывались как точки нулевого размера. Большей частью такой подход обеспечивал вполне удовлетворительные результаты, но все эти теории неизбежно сталкивались с "болезнью бесконечности", и для ее лечения, а точнее подавления симптомов, приходилось прибегать к разным математическими "снадобьям" (включая "перенормировки"). С течением времени проблема стала совершенно невыносимой: все больше и больше квантовых полей приходилось вводить в описание каждой элементарной частицы, чтобы нарисовать полную картину. Использование струн позволяет связать части с большей аккуратностью. Если рассматривать базовые элементы природы не в виде точек, а в виде струн (линий), все неприятные расхождения в расчетных величинах, описывающих специальные формы симметрии во Вселенной, волшебным образом исчезают. Это происходит благодаря

фундаментальным различиям в том, как взаимодействуют между собой точки и линии. На рисунке 2.2 схематично представлено взаимодействие точечных частиц и струн в пространстве и времени. Для точечных частиц характерны острые углы, которые математически выражаются бесконечными выражениями, в то время как напоминающая трубчатую структуру картина взаимодействия струн получается совершенно гладкой и избавленной от вышеназванных неприятностей.

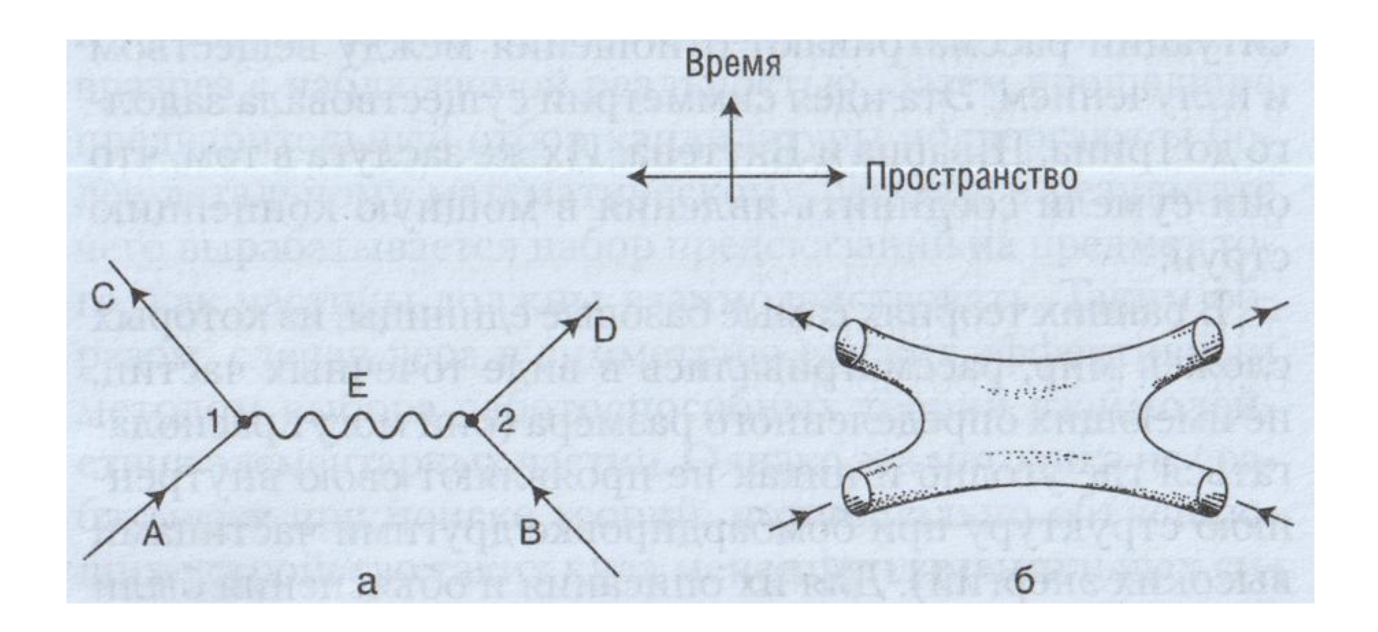


Рисунок 2.2. (а) – взаимодействие между двумя точечными частицами А и В, которые, обменявшись Е, переходят в состояния С и D; (б) – взаимодействие между двумя струнными петлями, приводящее к возникновению двух результирующих струн. Для удобства представления процессов в пространстве и времени все измерения первого идеализированно сведены в одно. Когда точка движется через пространство и время, она очерчивает линию, тогда как при движении петли вырисовывается трубка. Математические бесконечные выражения, ассоциируемые с точечными взаимодействиями, возникают из-за острых углов, образующихся в точках 1 и 2. При взаимодействии струн острые углы не возникают, и непрерывно-гладкий характер получающейся поверхности влечет за собой отсутствие бесконечных выражений в математических расчетах.

Эти фундаментальные струны обладают натяжением, которое варьируется в зависимости от состояний окружающей среды. В условиях низких энергий (их мы наблюдаем сегодня) оно может быть достаточно сильным, так что струнные петли сжаты практически в точки. Но в экстремальных условиях Большого взрыва струнная природа материи должна была проявляться более явственно. Именно эти теории разбудили в сообществе физиков увядший было интерес к поискам "теории всего". По идее, она должна включать в себя все законы радиоактивности, гравитации,

электромагнетизма и ядерной физики. Самым интересным аспектом теории струн стало неожиданное открытие того обстоятельства, что единственным сдерживающим фактором остается, судя I ю всему, лишь требование конечности и непрерывности.

Стремясь кодифицировать законы природы в уникальную и самодостаточную "теорию всего", мы ищем в мире высшие формы симметрии, из сдерживающих рамок которых будут проистекать все дозволенные законы преобразований, управляющие физическими силами и частицами. К этой кажущейся панацее нужно подходить с оглядкой на то, как законы природы – единая теория всего – соотносятся со Вселенной.

Бесконечность - быть или не быть?

Доведи меня до предела еще разок.

"The Eagles"

Идеи вечности и беспредельности манили и волновали умы людей на протяжении тысячелетий. И на Востоке, и на Западе вырабатывались сложные концепции бесконечности и велись споры о возможности включения этого понятия в различные модели мироздания. Аристотель первым четко разделил "актуальную" и "потенциальную" бесконечность еще в IV веке до н. э. "Актуальная" разновидность бесконечности, под которой понимаются бесконечно большие значения наблюдаемых или измеряемых величин здесь и сейчас, была объявлена вне закона. А вот понятие потенциально бесконечной последовательности – скажем, бесконечный перечень натуральных чисел или бесконечность будущего времени, где бесконечность только подразумевается, но в реальности не достигается, – Аристотель разрешил, сочтя его достаточно безобидным.

Отношение древних мыслителей к актуальной бесконечности во многом отражало их взгляд на существование вакуума. Для Аристотеля эти два понятия были нерасторжимо связаны между собой, потому что в пустом пространстве никакого сопротивления нет, отчего скорость движения тел с течением времени могла бы стать бесконечной. Следовательно, абсолютный

вакуум в физическом мире существовать не может. Средневековые схоласты разработали изощренные аргументы, позволявшие избегать всякого упоминания бесконечности или вакуума. Придуманная ими специальная "небесная сила" выполняла роль цензора, внимательно следя за тем, чтобы реальный вакуум или актуальная бесконечность никогда не проявились в природе, даже если бы это не противоречило законам механики.

С тех пор произошло много событий, повлиявших на наши взгляды. Но тема по-прежнему вызывает затруднения у теологов, философов и естествоведов, которые по сей день пытаются привести это понятие к удобоваримому виду, понять, каких она бывает форм и размеров, и решить, нужно ли ее запретить или, наоборот, сказать ей добро пожаловать в научную картину мира. Мало того, сегодня бесконечность становится еще более животрепещущим вопросом. Мы уже видели, что ученые последнюю четверть века бьются над тем, чтобы объединить все известные физические законы в единую математическую формулу. И в выборе подхода к этим поискам очень большую роль играет отношение к возможности существования актуальной физической бесконечности.

В физических теориях элементарных частиц появление бесконечного ответа на вопрос о конкретной величине какого-то измеримого параметра всегда воспринимаюсь как предупредительный сигнал о допущенной ошибке. На протяжении десятилетий это неизбежное появление бесконечности в расчетах удавалось предотвращать с помощью специальной процедуры вычитания бесконечностей, а конечный остаток использовали для сравнения результатов наблюдений. Хотя итоги этой так называемой "перенормировки" очень хорошо согласовывались с экспериментальными данными, чувство сомнения, ощущение того, что подобные математические ухищрения не могут быть частью естественного порядка вещей, не покидало ученых. Истинная теория все-таки должна быть законченной.

Все изменилось в 1984 году, когда Грин и Шварц предложили свой вариант физической теории – теорию суперструн, – где никакая бесконечность вообще не упоминалась. Энтузиазм, с которым физики встретили новшество, был следствием этой постоянной борьбы с бесконечностью, вконец измучившей всех.

Но из-за отсутствия экспериментальных подтверждений точка в признании теории суперструн все еще не поставлена. Однако энергия, которую затрачивают ученые, пытаясь их получить, отражает их убежденность в том, что появление актуальной бесконечности в любой

физической теории является тревожным сигналом, указывающим на то, что наука в этой части выходит за рамки практической применимости. Стандартная реакция на такое положение вещей – попытки усовершенствования теории, с тем чтобы бесконечность уступила место пусть очень большим, но конечным результатам. Например, эта практика хорошо известна инженерам. В простых моделях стремительных аэродинамических потоков от бесконечных величин удается избавиться, просто вводя более реалистичные значения потерь от трения о воздух. Хлопок при взмахе кнутом возникает вследствие преодоления кончиком кнута звукового барьера. Если сделать простой расчет без учета трения воздуха, мы получим бесконечно быстрое изменение определенных параметров. Но более детальное моделирование свойств воздушных потоков превращает бесконечно быстрые изменения в очень быстрые, но конечные.

Несмотря на всеобщее примирение с тезисом "наличие бесконечности означает, что теория нуждается в дельнейшей отладке", у физиков-космологов отношение к актуальной бесконечности все-таки иное. Они видят во Вселенной много мест, где та или иная форма бесконечности может оказаться совершенно реальной. Во многих случаях речь идет о бесконечности "потенциальной" – бесконечные размеры Вселенной, бесконечным может быть будущее ее существования, число содержащихся в ней атомов или звезд. Это все потенциальные бесконечности в аристотелевом смысле. Но есть в них один аспект, который кажется тревожным с точки зрения здравого смысла. Хотя потенциальная бесконечность не представляет прямой угрозы действительности, нам все-таки приходится иметь дело с ницшеанским парадоксом вечного возвращения: если Вселенная бесконечна по протяженности и вся материя в ней распределена случайным образом, тогда любое событие, имеющее конечную вероятность и происходящее здесь и сейчас (например, вы читаете эту книгу), должно бесконечно долго воспроизводиться в других местах Вселенной. Кроме того, если событие имеет альтернативные продолжения, все они осуществляются в разное время и в разных местах Вселенной; правильные решения принимаются наряду и одновременно с неправильными.

Такая постановка вопроса является тяжелым испытанием для этики и теологии любой религиозной окраски. Некоторые находят положение настолько тревожным, что в нем самом начинают видеть аргумент в пользу конечной Вселенной. Однако следует помнить, что благодаря

существующему пределу скорости света мы избавлены от возможного контакта со своими "двойниками". Мы способны получать сигналы только из конечной части Вселенной. Расстояние, которое нам нужно преодолеть, прежде чем мы можем рассчитывать встретить копию себя, составляет $10^{10^{28}}$ метров, тогда как наибольшее расстояние, которое свет преодолевает за то время, пока существует Вселенная, не превышает 10^{27} метров. Так что с практической точки зрения можно утверждать, что мы живем в конечной Вселенной.

Трудности космологов на этом, однако, не заканчиваются. Им также приходится побеспокоиться и о самых настоящих актуальных бесконечностях. На протяжении десятилетий счастливо довольствовались идеей, что пространственно-временная Вселенная начала расширяться из изначальной сингулярности Большого взрыва, когда температура, плотность и практически все остальные параметры были бесконечно большими в какой-то конечный момент времени в прошлом. Кроме того, когда в крупных звездах истощается ядерное топливо и они катастрофическим образом сжимаются под действием собственной гравитации, звезды как будто обречены достичь состояния бесконечной плотности за конечный промежуток времени. Но все эти острые углы удавалось как-то обходить. Считалось, например, что черные дыры всегда окружены "горизонтом событий" – поверхностью невозврата, которую можно пересечь только в одном направлении, – так что мы не в состоянии ни увидеть извне бесконечную плотность, возникающую в центре черной дыры, ни испытать на себе ее эффекты.

Роджер Пенроуз из Оксфордского университета считает, что актуальная бесконечность действительно имеет место как в начальный момент зарождения Вселенной, гак и в центре черных дыр. Он высказал предположение, что законы природы играют роль космической цензуры, которая следит за тем, чтобы такая обнаженная физическая бесконечность всегда оставалась спрятанной за горизонтом событий. Эта идея вызывает в памяти средневековую небесную силу, придуманную для недопущения возникновения абсолютного вакуума. Она подразумевает, что эффекты физической бесконечности сосредоточены внутри черной дыры и могут повлиять на внешний мир. Но космологическая бесконечность в начале существования Вселенной не могла не повлиять на нас и, согласно такой точке зрения, предопределила все, что мы видим во Вселенной сегодня. С другой стороны, сторонники физики элементарных частиц склонны смотреть на черные дыры и космологические бесконечности просто как на тревожный

сигнал, предупреждающий, что теория зашла слишком далеко и нуждается в таких улучшениях, которые устранили бы всякое упоминание о бесконечности. Вследствие этого мы проявляем огромный интерес к идее пульсирующих вселенных и пытаемся экстраполировать расширяющиеся вселенные назад по оси времени, к моменту их предполагаемого возникновения или "отскока". Некоторые космологи предполагают, что нынешнее расширение нашей Вселенной – следствие "отскока", имевшего место по окончании очередного периода сжатия в условиях конечной плотности и температуры.

Снаружи мы не можем видеть, что происходит внутри черной дыры. Но если мы попадем в нее, наша судьба по мере приближения к центру будет оставаться неопределенной. Ждет ли нас реальная физическая бесконечность, или энергия выскальзывает в другое измерение пространства, или просто исчезает, или поглощается ни на мгновение не прекращающимися колебаниями суперструн в сокровенном центре всякой материи и энергии? Мы этого не знаем. Но главным руководящим принципом здесь снова выступает противостояние конечного и бесконечного. Мы можем воспринимать появление бесконечности как сигнал, требующий усовершенствовать теорию, или относиться к ней с большей серьезностью, как к указанию на то, что существуют новые, неизвестные нам типы законов. Они управляют бесконечно большими физическими величинами, и от них, возможно, зависит, как начиналась наша Вселенная и что в дальнейшем будет с материей, находящейся под постоянным воздействием гравитации.

Космологам приходится иметь дело с еще одной странной потенциальной бесконечностью – возможностью бесконечного будущего. Будет ли нынешняя Вселенная существовать вечно? Этот вопрос очень быстро приводит нас в область философии: а что такое "вечно"? И в область биологии: а может ли жизнь в какой бы то ни было форме существовать вечно? И в область гуманитарных наук: каково это было бы для нас с точек зрения социальной, личной, юридической, материальной, эмоциональной и психологической – жить вечно? Последний вопрос, впрочем, может показаться самым простым. В долгосрочной перспективе вечная жизнь наверняка оказалась бы не столь привлекательной, как это выглядит на первый взгляд. Возможно, появились бы телевизионные проповедники, обещающие конечную жизнь в обмен на хорошее поведение.

Математикам тоже пришлось столкнуться с реалиями бесконечности. Дважды за последние 120 лет между ними вспыхивала "гражданская война" по этому вопросу, оставившая после себя много конфликтов и обид. Одни хотели запретить актуальную бесконечность и перечертить границы реальности, чтобы никто даже не думал относиться к ней как к чему-то существующему. Другие горячо возражали и подвергали первых остракизму.

Как мы увидим в следующей главе, немецкий математик XIX века Георг Кантор первым показал, как можно справиться с парадоксами бесконечности. Он дал элегантное определение бесконечным множествам: это множество, в котором существуют взаимнооднозначные соответствия с его же собственными подмножествами. Что позволило продвинуться дальше и ответить на более глубокие вопросы: может ли одна бесконечность быть больше другой; можно ли придумать или построить бесконечность, больше которой ничего не может быть, или же бесконечности образуют бесконечно растущую иерархию? Кантор четко ответил на все вопросы, но до признания величия своих трудов со стороны других математиков он так и не дожил. При жизни ученый оставался в тени влиятельных оппонентов, противников бесконечности, так что в отчаянии время от времени бросал математику и углублялся в изучение истории и теологии. Незадолго до смерти в 1918 году он страдал от сильных приступов депрессии.

Интересно отметить, что первыми осознали важность проделанной Кантором работы теологи. Они давно искали способ придать смысл бесконечностям, то и дело мелькающим в их доктринах. Не должен ли только Бог быть бесконечным и "больше" всяких мирских бесконечностей? Многие исследования не получали должного признания только по той причине – будто бросали вызов распространенному убеждению, что только Богу можно быть бесконечным. Труды Кантора изменили все. Он показал, что существует нескончаемая иерархия бесконечностей, где каждая следующая неоспоримым образом больше предыдущей. Это позволило выделить три категории бесконечности: математическую, физическую и трансцендентальную. Одни принимают существование всех трех типов, другие соглашаются только с частью из них, а третьи продолжают отвергать ее в любом виде. Древние философы, начиная с Зенона, пытались справиться с парадоксами бесконечности на многих фронтах. Но как насчет философов сегодняшних? Какие проблемы их волнуют? На стыке естественных наук и философии возникает животрепещущий вопрос о возможности построения бесконечной машины, способной выполнять бесконечное число задач в течение конечного периода времени. Разумеется, здесь требуются

некоторые уточнения: что конкретно понимается под терминами "возможность", "задачи", "число", "бесконечный", "конечный" и, не в последнюю очередь, "время"? Классическая фишка почти не накладывает ограничений на функционирование бесконечной машины, потому что не устанавливает пределов скорости, с которой могут передаваться сигналы и переключаться рычаги. Законы Ньютона существование бесконечной машины не запрещают. Это можно увидеть, воспользовавшись открытием, которое н 1971 году сделал американский математик Джефф Ся, изучавший свойства ньютоновской динамики. Возьмем для начала четыре частицы одинаковой массы и расположим их как две бинарные пары, вращающиеся с равными, но противоположно направленными спинами в двух параллельных плоскостях. Теперь введем пятую частицу меньшей массы, которая колеблется вверх-вниз вдоль перпендикулярной плоскостям вращения линии, проходящей через центры масс двух вращающихся бинарных пар. Ся показал, что система из этих пяти частиц расширится до бесконечного размера за *конечное* время! Как это происходит? Меньшая частица мечется между двумя бинарными парами, всякий раз порождая неустойчивую троицу тел. Оттолкнув от себя меньшую частицу, пара больших раздвигается, чтобы сохранилось суммарное количество движения. Затем более легкая частица приближается к другой паре, и в образовавшейся тройке повторяется то же самое. Это продолжается без конца, но частицы, образующие бинарные пары, раздвигаются с таким сильным ускорением, что расстояние между ними становится бесконечным, в то время как легкая частица осуществляет бесконечное число колебаний.

К сожалению (или, может быть, к счастью), такое повешение частиц невозможно в релятивистской модели мира. В эйнштейновской теории движения и гравитации информация не может передаваться быстрее скорости света, а сила притяжения – становиться произвольно большой; массы не могут сходиться и расходиться как угодно близко и далеко: есть предел сближения, по преодолении которого "горизонт событий" уже не даст частицам выбраться из образовавшейся черной дыры. В этом случае их судьба останется в буквальном смысле тайной за семью печатями – бесконечная машина такого рода не сможет посылать информацию во внешний мир. Однако это не означает, что релятивистские бесконечные машины невозможны в принципе. Напротив, относительность времени, которая применяется ко всем наблюдателям, как бы они ни двигались, открывает интересные новые возможности в плане выполнения бесконечного количества задач за конечное время. Возможно ли такое, что

один наблюдатель двигался достаточно быстро, чтобы увидеть бесконечное количество вычислительных операций, совершенных за конечное время его жизни?

Знаменитый и весьма мотивирующий пример такого рода – так называемый парадокс близнецов. Они по-разному устроили свою жизнь. Один – "домосед", а второй – "путешественник" – отправляется в космический полет, осуществляемый на скоростях, близких к скорости света. Теория относительности предсказывает: когда они снова встретятся, "домосед" окажется гораздо старше "путешественника". Время для последнего течет медленнее в периоды ускоренного и замедленного движения, без которых полет невозможен. Можно ли отправить в такой экстремальный полет компьютер, чтобы он успел выполнить бесконечное число операций к моменту своего возвращения к оставшемуся дома хозяину? Итамар Питовски, специалист по философии науки из Еврейского университета в Иерусалиме, утверждает, что если космический корабль "путешественника" сможет набрать околосветовую скорость достаточно быстро за счет огромного ускорения, тогда на его часах отобразится конечное время истории Вселенной, в то время как стрелка на часах "домоседа" пробежит бесконечное число кругов. Не исключено, что это означает возможность существования "платоновского компьютера", способного выполнить бесконечное число операций за время полета по какой-то траектории в пространстве-времени и распечатать ответы, которые мы сможем увидеть по его возвращении домой. Увы, есть одна проблема: чтобы получатель информации с такого компьютера мог оставаться на связи, он сам тоже должен двигаться с огромным ускорением. С течением времени гравитационные силы станут колоссальными, и вся система, если она имеет размер, разлетится на кусочки.

Невзирая на эти проблемы, был составлен специальный перечень свойств вселенных, дозволяющий выполнение бесконечного числа задач за конечное время (с этой целью ввели специальный термин – "суперзадача"). Миры, отвечающие этим критериям, называют вселенными Маламеита – Хогарта, в честь Дэвида Маламента, философа из Чикагского университета, и Марка Хогарта, бывшего аспиранта Кембриджского университета, который в 1992 году занимался изучением условий, при которых суперзадачи становятся теоретически возможными. Последние все еще оставляют широкий простор для исследователей с точки зрения открытия или создания условий, при которых возможно выполнение бесконечного числа задач за конечный промежуток времени. В перспективе решение этой проблемы

имело бы значительные последствия для математики и компьютерных технологий, потому что привело бы к смыванию граней между вычислимыми и невычислимыми задачами.

То, что вселенные М – X в принципе возможны, можно было бы счесть приятным сюрпризом, но, к сожалению, в числе их свойств есть такие, которые приходится признать нереалистичными, если только не согласиться на такие тревожные для здравого смысла вещи, как перспектива беспричинного возникновения вещей и путешествий во времени. Однако еще большую тревогу вызывает побочный продукт деятельности созданной бесконечной машины. Наблюдатель, случайно попавший в "плохую" часть такой Вселенной, обнаружит, что возможность выполнять бесконечное количество операций за конечное время оборачивается тем, что любое количество излучения, каким бы маленьким оно ни было, сжимается до нулевой длины волны и усиливается до бесконечно большой амплитуды. Поэтому при любой попытке передать данные, полученные компьютером после бесконечного числа операций, все принимающие устройства будут уничтожены.

До сих пор казалось, что все вышеназванные проблемы исключают всякую практическую возможность построения релятивистской бесконечной машины, гарантирующей надежное получение и хранение информации. Но в число вселенных, где возможно выполнение бесконечного количества операций за конечное время, входит также "пространство анти-де Ситтера", играющее ключевую роль в тех самых теориях суперструн, которые привлекают как раз своей кажущейся конечностью. Не исключено, что бесконечность еще сыграет новые и неожиданные роли во вселенской драме.

От струн к теории "М"

- *Но неужели вы и вправду считаете, сэр, – сказал Питер, – что существуют другие миры... тут, рядом, в двух шагах от нас?*

- *В этом нет ничего невероятного, – сказал профессор, снимая очки и принимаясь их протирать. – Интересно, чему же все-таки их учат теперь в школах, – пробормотал он про себя.*

Клайв С. Льюис.

"Лев, колдунья и платяной шкаф"

За воодушевлением, с которым научное сообщество встретило доказательства финитности теории струн, последовали многие годы дотошных исследований, осуществляемых силами молодых математиков и физиков, хлынувших на этот передний край науки. Прогресс шел медленно и трудно. Выяснилось, что есть пять разновидностей теории струн, которые можно рассматривать как прототип "теории всего" – все финитные, логически непротиворечивые, но при этом совершенно разные. Это немного сбивало, вносило сумятицу. Мы сотню лет ждали появления "теории всего" – и тут их сразу пять. Название каждой связано с используемой математической моделью: это теории суперструн типа I, типа IIA и типа IIIB, теории гетеротических струн $SO_{(32)}$ и E8. А еще есть 11-мерная теория супергравитации. Все они необычны в том плане, что используют 10 измерений пространства-времени, за исключением последней, требующей 11. Число измерений не является необходимым для финитности теории, обычно предполагается, что лишь одно из 10 или 11 представляет собой "время", а все остальные оси – пространственные. Разумеется, мы не живем в 10- или 11-мерном пространстве, поэтому необходимо предположение, что только три пространственных измерения в этих теориях "развернуты", тогда как остальные "свернуты" и ограничиваются неизмеримо малыми размерами. То, что для получения финитной теории требуется гораздо больше измерений пространства, чем известные нам три, -- весьма любопытное обстоятельство. Большое количество измерений можно истолковать как потребность оставить место для размещения в рамках единой теории конфигураций всех четырех известных нам фундаментальных взаимодействий, чтобы не дать им раствориться в субконфигурациях,

которые больше говорят о самих себе, чем обо всем остальном. Никто не знает, почему в нашем мире именно три развернутых измерения (а не одно, четыре или, скажем, восемь) и является ли их число чем-то случайным (а значит, могло бы быть другим – и *может* быть другим в каких-то частях Вселенной) или неизбежно вытекает из законов физики и потому не может измениться без нарушения логической непротиворечивости теории. Одно мы знаем точно: только в пространствах с тремя развернутыми измерениями формируются атомы, молекулы, планеты и звезды. Сложные структуры и жизнь возможны только в пространствах с тремя развернутыми измерениями. Даже если число развернутых измерений в разных частях Вселенной разное или есть вселенные с разным числом развернутых измерений, ни в каком другом мире мы существовать не смогли бы – только в трехмерном.

Поначалу была надежда, что одна теория как-то сама собой выделится среди других и на ней будет сосредоточено все внимание как на потенциально истинной "теории всего". К сожалению, все оказалось сложнее, и прогресс был очень медленным и едва заметным, пока Эдвард Виттен из Принстонского университета не обнаружил, что эти три теории струн не так уж разнятся. Они связаны друг с другом посредством математических преобразований, которые сводятся к замене по особым правилам больших расстояний на малые и наоборот. Но дальше выяснилось, что пять теорий струн были не настолько уж фундаментальными. Каждая является ограниченным случаем другой, более фундаментальной, но еще не открытой единой теории, которая прячется где-то в 11 измерениях пространства-времени. Эта теория получила название "теории М", где "М" можно читать как "матрицу" или "миллениум" – как вам больше нравится. Теорию "М" можно изобразить в виде шара (см. рисунок 2.3), часть поверхности которого занимают пять теорий струн как частные случаи – словно пятна на сфере. Присутствие 11-мерной теории супергравитации на поверхности шара подразумевает, что скрытая теория "М" тоже 11-мерна, но выглядит в некоторых местах как 10-мерная.

За этими математическими открытиями последовали интенсивные поиски фундаментальной теории "М". Но она по сей день не сформулирована. Попутно кристаллизировались другие концепции. Идея Лизы Рэндалл и Рамана Сандрама состояла в том, что трехмерное пространство, в котором мы живем, можно представить, как поверхность в пространстве с большим числом измерений, где сильное, слабое и электро-

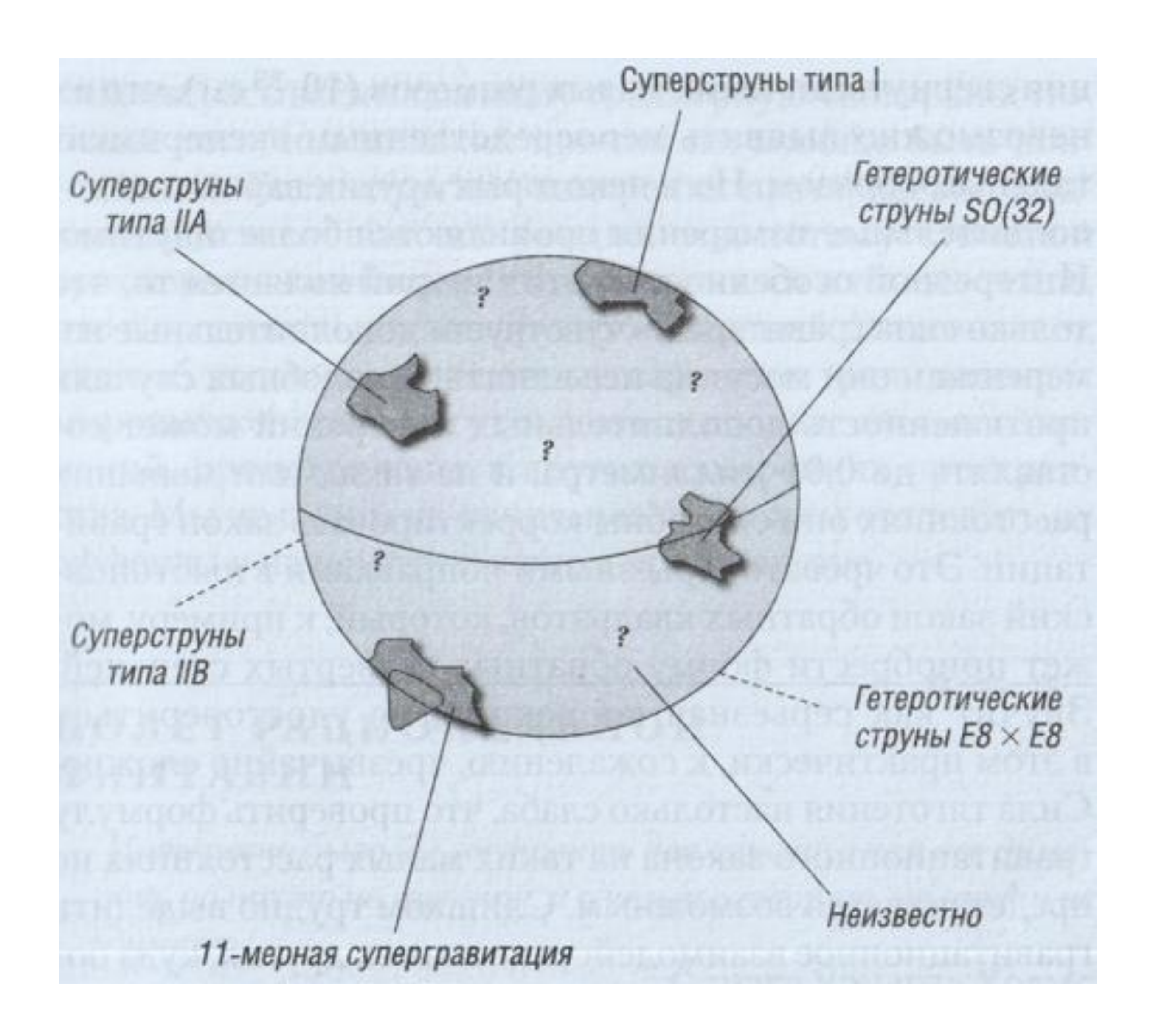


Рисунок 2.3. Известные теории струн выглядят частными случаями более фундаментальной теории "М", которую еще только предстоит открыть. Каждая описывается той или иной формой математической симметрии. Все они, кроме 11-мерной супергравитации, существуют только в 10-мерном пространстве-времени.

магнитное взаимодействия проявляют себя только на этой трехмерной поверхности, тогда как сила гравитации распространяется и на другие измерения. Вот почему гравитационное взаимодействие значительно слабее трех других фундаментальных сил природы.

Но существуют ли в реальности "дополнительные" измерения? Это ключевой вопрос для всех новомодных "теорий всего". В большинстве версий лишние измерения свернуты до таких малых размеров (10^{-33} см), что их невозможно выявить непосредственным экспериментальным образом. Но в некоторых других вариантах дополнительные измерения проявляются

более ощутимо. Интересной особенностью этих теорий является то, что только сила гравитации "чувствует" дополнительные измерения и они могут на нее влиять. В подобных случаях протяженность дополнительных измерений может составлять до 0,01 миллиметра, и на таких или меньших расстояниях они способны корректировать закон гравитации. Это чревато серьезными поправками в ньютоновский закон обратных квадратов, который, к примеру, может приобрести форму обратных четвертых степеней. Звучит как серьезная коррекция, но удостовериться в этом практически, к сожалению, чрезвычайно сложно. Сила тяготения настолько слаба, что проверить формулу гравитационного закона на таких малых расстояниях не представляется возможным. Слишком трудно выделить гравитационное взаимодействие из всех других, куда более выраженных форм взаимодействия столь близко расположенных тел, таких как адгезия, трение, магнетизм и т. д. Посмотрите хотя бы на муху на потолке: сила тяготения, действующая на нее, слишком слаба, чтобы оторвать ее лапки, прицепившиеся к побелке. В этой ситуации физики стоят перед очень сложной, но интересной задачей: экспериментально проверить закон гравитации в субмиллиметровых масштабах.

Многомерность имеет еще одно интересное последствие, о котором мы подробнее поговорим в главе 5. Оно связано с изменением величины мировых констант. Если мы признаем, что живем в 9- или 10-мерном пространстве, это будет иметь то важное следствие, что и мировые константы существуют в такой же многомерности. Те величины, что мы измеряем в лабораториях и по привычке называем константами, на самом деле отнюдь таковыми не являются, будучи лишь тенью многомерных реалий, отбрасываемых на нашу трехмерную "поверхность". Более того, нет никаких причин им вообще быть константами. Если "другие" измерения претерпевают медленные изменения, мы увидим это, потому что наши трехмерные "константы" будут меняться в том же темпе, что и средняя величина других измерений. Это означает, что наблюдаемые крошечные вариации традиционных мировых констант могут оказаться последствиями изменений, происходящих в других измерениях пространства. Мы не видим их напрямую, но можем отследить их эффекты в нашем трехмерном пространстве.

Полет рациональной фантазии

Интересно было бы составить два списка: о чем все думают, но никто не говорит, и о чем все говорят, но никто не думает.

Оливер Уэнделл Холмс

Теперь рассмотрим несколько простых вариантов возможного статуса физических законов во Вселенной. Они представляют собой современные версии некоторых древних парадигм. Ради простоты ограничимся рассмотрением трех концепций: Бога (G) в его традиционном смысле как сущности всезнающей и всемогущей; Вселенной (U), охватывающей весь материальный мир пространства и времени; законов природы (L), в которых прописано устройство и функционирование мира. Предполагаемые взаимодействия и составляют предмет исследования многочисленных естествоведов и философов. Если взять пару U и L, то у нас есть на выбор пять простых позиций:

1) U является подмножеством L;
2) L является подмножеством U;
3) L совпадает с U;
4) L не существует;
5) U не существует.

Эти варианты расположения показаны на рисунке 2.4.

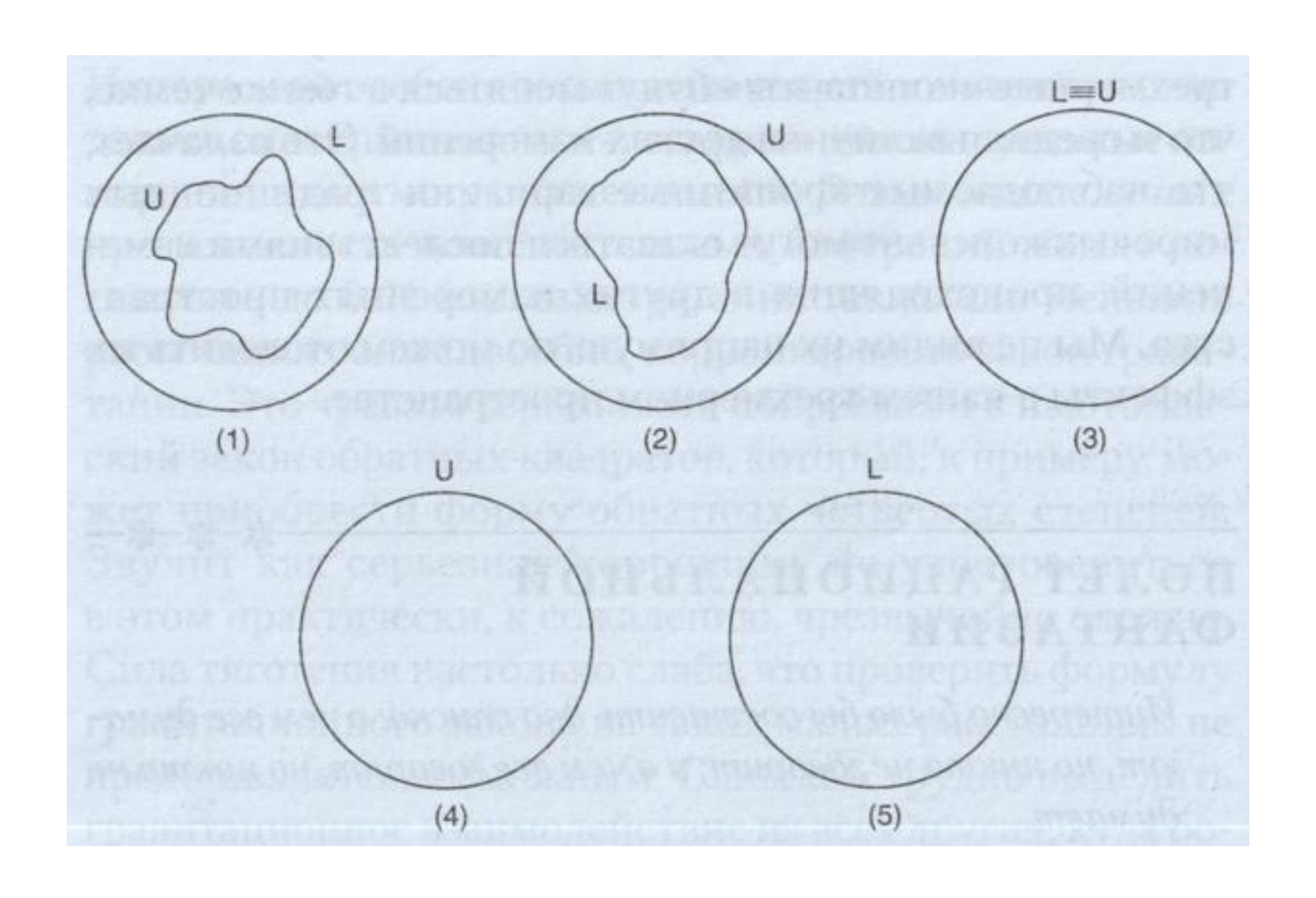


Рисунок 2.4. Возможные взаимоотношения между концепциями U – материальной Вселенной – и L – законами природы.

В первом варианте законы природы – что-то внешние, трансцендентное по отношению ко Вселенной. Она является не более чем одним из частных проявлений этих законов. Следовательно, могут существовать и другие вселенные, потенциально или реально. Важно отметить, что недавно развернутые исследования, призванные математически рассчитать возможность создания Вселенной из "ничего", как раз предполагают наличие ситуации 1. Необходимо сделать допущение, что физические законы и другие фундаментальные понятия (например, логика) существовали до того, как возникла материальная Вселенная. Если такая исследовательская программа окажется успешной и позволит получить непротиворечивую картину рождения физической Вселенной (причем теоретические прогнозы, сделанные на ее основе, будут раз за разом подтверждаться экспериментально), тогда следующий шаг – найти ответы на вопросы: почему физические законы, которые допустили и обеспечили возникновение именно этой, а не какой-то другой Вселенной, сами существуют; могли ли они быть какими-нибудь другими? Решение задачи – дело далекого будущего, но нелишне отметить, что, если Вселенную в целом

можно описать законом того типа, что заложен в общую теорию относительности Эйнштейна, тогда обязательно должна существовать логическая структура, превосходящая размерами физическую Вселенную. Неудивительно, что такой посыл неявным образом подразумевается в большинстве космологических исследований. Одно из них рассматривает различные математические модели Вселенной, которые подчиняются одному и тому же своду законов, но различаются выбором исходных состояний. К сожалению, никакие наблюдения не могут подсказать нам, насколько та или иная математическая модель космологической теории действительно описывает всю Вселенную, потому что мы можем созерцать только ее конечную часть.

Если мы примем за основу вариант 2, тогда придется признать, что физическим законам присуща пространственная или временная зависимость в границах Вселенной. За пределами наблюдаемого мира они могут быть другими или же их там вовсе нет. Возможно, в "дикой" бесконечной Вселенной тут и там попадаются островки рациональности. Поскольку мы знаем, что существование наблюдателей, похожих на нас, и даже совсем не таких, как мы, требует существования определенных правил и регуляции, мы не должны удивляться, если выясним, что населяем один из рациональных островков в этой хаотической Вселенной. Предпринимались попытки показать, что разумно начинать изучение эволюции Вселенной из такого состояния, которое не совсем отвечает требованиям законов в том виде, какие мы знаем сегодня, но при этом "обещает", что, по мере того как мир будет расширяться, взрослеть и остывать, феномены, расходящиеся с тем, что мы привыкли считать законами природы, будут случаться все реже. Теперь в современном низкоэнергетическом мире, через 15 миллиардов лет после начала времен, мы наблюдаем такое соответствие феноменов нашим законам, что оно нам кажется идеальным. Эта философская теория, доведенная до логического завершения, призвана показать, что все, или почти все, наблюдаемые в природе законы присущи лишь текущему этапу космической истории, на котором мы появляемся на сцене. Во времена, более приближенные к моменту Большого взрыва, ситуация была совсем другой, и в мире большей частью царило беззаконие.

Другая, более скептическая интерпретация второго варианта – взгляд на законы природы как на следствие мыслительных процессов человеческого разума, который сам стал порождением естественного развития Вселенной. В разных ее частях история и законы обязательно были бы другими: внешние факторы требовали бы иных реакций, и эволюция, без

сомнения, пошла бы другим путем. С этой позиции физические законы являются полностью или частично порождением разума и варьируются сообразно распределению разумных существ во Вселенной. Данная точка зрения, довольно широко распространенная среди философов, удовлетворить естествоведов никак не может, потому что не дает возможности разработать какую-либо исследовательскую программу, которая могла бы эту теорию проверить, опровергнуть или наполнить фактическим содержанием. Будучи логически завершенной, эта теория является тупиковой, потому что не открывает простора для практической деятельности. Нам остается лишь дождаться контакта с гипотетическими инопланетянами и сравнить их законы с нашими.

Третья альтернатива представляет Вселенную и физические законы в духе, восходящем к святому Августину и Филону Александрийскому, которые, чтобы не решать вопрос о том, чем занимался Бог до сотворения мира, учили, что никакого "до" не было вообще, потому что время было создано вместе со всей Вселенной. Такой подход подразумевает, что время в каком-то более глубоком смысле ассоциируется с физическими событиями, происходящими во Вселенной, нежели просто служит трансцендентальным фоном для них. Это само собой приводит к мысли, что Вселенная является ровесницей времени. По мнению Филона,

> "время не существовало до мира, но появилось либо вместе с ним, либо после, ведь, поскольку время есть отрезок движения мира, движение не могло бы возникнуть прежде того, что подлежит движению, но необходимо признать, что оно появилось или после, или одновременно с ним. Следовательно, необходимо признать и то, что время одного возраста с миром или младше его".

Такой точки зрения придерживались и современные космологи. Прежде чем ученые всерьез занялись квантовой космологией, им приходилось мириться с выводом, что наша Вселенная в прошлом должна была пережить пространственно-временную сингулярность в какой-то конечный момент времени. До этого она не существовала. Вселенная возникла после нее. Математическое описание пространства-времени предсказывает, что обе концепции – и пространство, и время – должны перестать существовать в сингулярности. Это своего рода граница Вселенной. И наоборот, мы вынуждены рассматривать вселенные, прошедшие через сингулярность, как возникшие буквально из ничего в какой-то момент, когда

одновременно родились материальная Вселенная, законы природы и сама система пространственно-временных координат.

Важно подчеркнуть, что общая теория относительности Эйнштейна предсказывает возможность существования сингулярности. Она не приводит никаких причин, почему такое рождение мира из ничего должно было бы произойти. Если столь радикальная идея рождения мира вас не устраивает, тогда есть возможность избежать всякого упоминания о злосчастной сингулярности. Если гравитация в каком-то далеком прошлом могла быть силой отталкивания, а не притяжения (а это выглядит достаточно вероятным с точки зрения наших нынешних знаний о том, как может вести себя материя в условиях очень высоких энергий), то Вселенной не было нужды возникать из сингулярности. Мы указываем на такую возможность только как на иллюстрацию третьего варианта. Данная альтернатива может также включать в себя и более широкий спектр возможностей, поскольку мы знаем, что Вселенная со временем расширяется и трансформируется. Означает ли это, что, приняв такую точку зрения, мы должны ожидать, что физические законы меняются с течением времени? В принципе, это не выглядит логически обоснованным. Законов либо нет вообще, либо они должны быть инвариантными. Любой из них восходит к инвариантности какой-то базовой величины в рамках соответствующей группы преобразований. Альтернатива – состоящая в отсутствии инвариантного фундамента – означала бы, что в природе вообще нет законов. И это подводит нас к следующему варианту.

Четвертая возможность, заключающаяся в том, что никаких законов в мире нет вообще, является крайностью. Сторонники этого взгляда могут выбрать две линии защиты своей точки зрения. С одной стороны, те, кто склонен к философствованиям, могут попытаться убедить нас в том, что то, что мы привыкли называть законами природы, на самом деле представляет собой ментальные категории, которые вынужден придумывать наш мозг, чтобы как-то объяснить и оправдать наш жизненный опыт, и за ними никакая сколько-нибудь глубокая реальность не скрывается. Более реалистичный подход состоит в следующем: представьте – как это делают некоторые физики, – что, по мере того как Вселенная расширяется и развивается из состояния хаоса, порожденного одновременным наличием всевозможных законов и порядков вещей, некоторые из этих форм становятся господствующими; за миллиарды лет господства они закрепляются и утверждаются во Вселенной, и в результате мы принимаем их за изначально существующие законы природы, хотя на самом деле они оказались лишь

наиболее жизнеспособными из множества альтернативных вариантов. Такую возможность мы, впрочем, уже обсуждали выше.

К этой же ситуации можно отнести и гипотезу, что существует множество вселенных, управляемых единым сводом законов. Каждая из них является следствием небольших "разночтений" в этих законах. До недавних пор такой подход считался философски возможным, но безосновательным с естественнонаучной точки зрения. Однако изучение более широких последствий теории инфляции Вселенной дает основания взглянуть на такую возможность более серьезно. Существуют наглядные свидетельства, поддерживающие идею о том, что видимая часть нашей Вселенной на очень ранних стадиях развития пережила период ускоренного расширения, называемый "инфляцией". Наблюдения за малыми вариациями температуры микроволнового излучения, оставшегося от самых ранних стадий развития Вселенной, показывают характерную картину статистических вариаций, совпадающую с предсказанием инфляционной теории, утверждающей, что мы живем в "пузыре", порожденном флуктуациями энергии и раздувшемся до неимоверных размеров. Но та же теория делает другие предсказания, которые куда хуже согласуются с результатами наблюдений. Так, малые флуктуации, резко раздувшиеся на ранних стадиях эволюции Вселенной, должны продолжать поддерживать дальнейшую инфляцию своих крошечных частей снова и снова. Этот вечный процесс само-воспроизводства порождает Вселенную, которая должна быть очень разнородной и стремительно меняться с течением времени. Мы живем в локальном пузыре, у которого есть начало и конец. Но мульти-вселенная, состоящая из подобных пузырей, начала и конца не имеет. Каждый ее сегмент может отличаться от других во многих аспектах. В простейших версиях этой теории различия ограничиваются возрастом и плотностью. В других вариантах они более фундаментальные: в разных пузырях может действовать разное число фундаментальных физических сил, и даже размерность пространства может быть разной. В этих случаях разные пузыри предстают разными вселенными, где действуют свои законы, хотя все они принадлежат одному и тому же общему пространству. Более того, каждая часть является следствием действия фундаментального свода законов природы, которые наделяют пузыри как общими чертами, так и многочисленными различиями. Некоторые из этих различающихся параметров – как, например, размерность пространства – мы всегда считали фундаментально и непреложно запрограммированными, но теперь оказывается, что они могут по-разному вытекать из одних и тех же законов

гравитации и физики элементарных частиц. Все возможно внутри одной Вселенной или – согласно некоторым другим теориям – в метафизически разделенных "других" вселенных, управляемых другими законами, являющимися логически непротиворечивыми модификациями тех, которые мы уже знаем. Во всех этих ситуациях Вселенная – будь она одна-единственная или одна из многих – является результатом действия физических законов и в метафизическом смысле в них содержится.

Последний из вариантов взаимодействия Вселенной и законов природы – отсутствие Вселенной как таковой – представляет собой причудливую форму нигилизма, которую ни один философ всерьез не воспринимает. Однако эта альтернатива все-таки представляет определенный интерес, потому что, если принимать всерьез квантовые космологические модели, подразумевающие возникновение Вселенной из ничего, "отсутствие" ее следует рассматривать как "предначальное" состояние. Поэтому нельзя утверждать, что такой вариант является логически невозможным или внутренне противоречивым, ведь он описывает состояние мира, предшествовавшее нынешнему, если стоять на космологической позиции возникновения Вселенной из ничего. Это состояние может казаться очень странным и неустойчивым, но убедительно показать, почему оно невозможно, затруднительно. Споры в данном направлении могут вызвать в памяти знаменитый онтологический аргумент Ансельма, доказывавший необходимость существования Верховной сущности самим фактом, что она существует в наших мыслях. Аргументация кажется особенно сомнительной, когда пытаешься представить, каким образом может осуществиться то, несуществование чего подразумевает логическое противоречие.

Однако многих больше волнуют взаимоотношения между концепциями Бога и Вселенной, нежели физическими законами и Вселенной. Действительно, концепция Верховной сущности во всех культурах является более фундаментальной и естественной по сравнению с концепцией законов природы. Можно даже утверждать, что никакая культура не способна сформировать прочные и глубокие представления о физических законах, предварительно не сформировав представления о Боге. И снова составим упрощенный список потенциальных возможностей:

I) U является подмножеством G;
II) G является подмножеством U;
III) G совпадает с U;
IV) G не существует;

V) U не существует.

Первый вариант – Вселенная является частью Бога – именуется панентеизмом, согласно терминологии, предложенной в XVIII веке немецким философом Краузе. Теологи отличают это мировоззрение от простого теизма, который подразумевает, что Бог совершенно не от мира сего, он выше Вселенной и вне ее. Панентеисты считают, что Бог присутствует во всех вещах, но не идентичен им.

Ситуация II согласуется с тем скептическим взглядом, что понятие "Бог" – целиком порождение человеческого разума и, следовательно, тех чисто материальных процессов, которые привели к появлению человеческого разума. Схожая картина получается, если допускается существование божества в роли Суперсущества с большими, но ограниченными возможностями. Такой сценарий патерналистского Суперсущества популярен в научно- фантастической литературе. В эту категорию можно отнести полурелигиозных энтузиастов, пытающихся ловить радиосигналы внеземных цивилизаций с передовыми по сравнению с человечеством формами интеллекта.

Третья из возможных альтернатив ассоциируется с доктриной пантеизма, которая считает, что Бог и Вселенная суть одно и то же. Такого мировоззрения придерживаются многие религии Востока, а также ученые-агностики. К этой точке зрения с симпатией относился сам Эйнштейн. Именно такой пантеистический взгляд на вещи он имел в виду, когда говорил, что верит в Бога Спинозы.

С остальными двумя вариантами справиться легко. Вариант IV – это чистой воды атеизм, а вариант V нами уже обсуждался выше.

Третья сторона нашего треугольника отношений – взаимоотношения между законами природы и Божеством:

a) L является подмножеством G;
b) G является подмножеством L;
c) G совпадает с L;
d) L не существует;
e) G не существует.

Первый случай соответствует иудео-христианской традиции, которая смотрит на законы природы как на ограничения, навязанные Вселенной Богом. Так, в частности, мыслил Ньютон, не раз утверждавший, что

физические законы могли бы быть другими и Бог волен произвольно их вводить и отменять.

Вторая возможность в чем-то сродни школе "теологии процесса", которая проповедует идею развивающегося Бога. В данном случае он сам ограничен логикой некоего высшего порядка. Такой взгляд трудно примирить с представлениями о всемогуществе Бога. Однако в этих представлениях все же присутствует идея, что действия Бога не совершенно произвольны, а следуют определенной логике и тесно связаны с концепциями добра и зла. Впрочем, этот вариант отношений между физическими законами и Богом можно интерпретировать атеистически, в том смысле, что концепция Бога является неизбежным результатом воздействия законов природы на разум некоторых видов сложных биокомпьютеров, коими являются и люди.

Третий случай напоминает безличный образ Бога, исповедуемый некоторыми пантеистами. Касается он и деистов, течение которых возникло в XVII веке как наименьший общий знаменатель, обеспечивающий выход из лабиринта, в котором заблудились богословы всех мастей. Приверженцы деизма сократили число атрибутов, ожидаемых от Бога во Вселенной, и свели Бога до роли первопричины и гаранта законов природы, обеспечивающих гармоничное развитие мира после акта творения. Случаи d и e уже были рассмотрены нами как случаи 4 и IV.

Скажем "прощай" всему

Всякой догме свое время.

Герберт Уэллс

Наше исследование законов природы было достаточно поверхностным. На то есть причины. Многие фактически ставят знак равенства между "теорией всего" и законами природы. Они считают, что поиск единой теории сводится к поиску самых фундаментальных и всеобъемлющих версий универсальных законов. При этом предполагается, что дело близко к развязке, что в основном мы уже знаем все, что нужно

знать в отношении устройства и функционирования окружающего мира, остались лишь мелочи. В последующих главах я намерен развенчать эту догму и объяснит ь, в каких еще аспектах физического мира, помимо традиционных представлений, нам необходимо разобраться, чтобы понять общую структуру мироздания. Придется открыть новые грани Вселенной, значительно углубить и расширить традиционные концепции законов природы, чтобы увязать и объединить их с другими построениями, которые в настоящее время остаются логически разрозненными.

От учения Бошковича до теории суперструн искатели единой "теории всего" фокусировали внимание на всеобъемлющих физических законах, забывая обо всем остальном. Такое предвзятое отношение выросло из неявной, неосознаваемой покорности перед авторитетом Платона, который подчеркивал, что вечные универсальные идеи в природе вещей гораздо важнее мира частностей, который мы наблюдаем и переживаем. В следующих главах мы узнаем, с какими трудностями в форме новейших научных представлений о природе физического мира сталкивается подобная точка зрения. Первая проблема нам уже хорошо знакома. Чтобы что-то вообще понять, надо знать, с чего все начиналось.

Глава 3

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Это случилось однажды, и это было очень хорошее время.

Джеймс Джойс

На краю мира

Наука – это дифференциальное уравнение. Религия – граничное условие.

Алан Тьюринг

Законы природы объясняют нам, как меняется все сущее. Однако за преобразованиями скрываются инварианты, некие неизменяемые величины, которые служат своего рода стержнем Вселенной. Природа может вытворять все что угодно, лишь бы эти заколдованные инварианты оставались неизменными. "Теория всего" призвана снабдить нас окончательной формулой всевозможных преобразований. В поисках ее мы должны руководствоваться тем принципом, что это должен быть единый закон, а не просто набор разрозненных правил. Логика Вселенной требует наличия единого инварианта, который остается неизменным вопреки всей сложности и изменчивости, которую мы наблюдаем на всех уровнях Вселенной, от мельчайших субатомных частиц до самых дальних пределов внешнего космоса. Идентификация вселенской симметрии, если она действительно существует и проявляется в постижимой для нас форме, может оказаться ближайшей вехой на нашем пути к раскрытию тайны Вселенной.

Однако и этого недостаточно. Даже если мы будем знать правила, которые соблюдают все явления, разобраться в существующем порядке

вещей сможем только тогда, когда будем знать, с чего все начиналось. Это наследие нашей веры в непреложность причинно-следственных связей во Вселенной и привычки представлять физические законы в форме дифференциальных уравнений или алгоритмов, где результат уникальным образом предопределяется вводимыми данными. Дифференциальное уравнение представляет собой математический механизм, который позволяет предсказывать будущее, если мы знаем настоящее. Точно так же оно позволяет, отталкиваясь от настоящего, реконструировать прошлое.

Аксиомы

Теорию множеств можно рассматривать как форму точной теологии.

ди Ракер

В математике роль начальных условий играют аксиомы. Это изначальные утверждения, которые постулируются до того, как мы приступаем к каким-либо дедуктивным рассуждениям. Классический пример – система аксиом в планиметрии, предложенная Евклидом в IV веке до н. э. С тех пор она служит образцом тщательного и основательного математического исследования. Аксиомы – изначальные допущения, которые воспринимаются как очевидные истины. На их основе делаются логические построения, следующие строгим правилам логического вывода. Последние аналогичны физическим законам, тогда как аксиомы уподобляются начальным условиям.

Мы не вольны выбирать любые аксиомы, какие вздумается. Их система должна быть логически целостной и непротиворечивой. Но в отношении количества никаких ограничений нет, хотя от выбранного нами числа аксиом будет зависеть многообразие тех логических выводов, что будут вытекать из них. Несмотря на то что Евклид и большинство других древних и средневековых математиков сознавали важность логической непротиворечивости, у них все-таки была склонность выбирать аксиомы, отражавшие устройство наблюдаемого мира. Так, аксиомы Евклида –

например, что параллельные прямые не пересекаются или что на плоскости есть только одна прямая, проходящая через две заданные точки, – являются самоочевидными истинами, с которыми без колебаний согласится каждый, кому приходилось чертить прямые на плоскости. В более поздние времена математики были уже не столь разборчивыми и довольствовались одной лишь логической непротиворечивостью. Аксиомы не обязаны были напрямую соответствовать чему-то такому, что мы можем наблюдать в окружающем мире или абстрагировать из него. Когда мы выбираем начальные условия для исследования глубочайших физических проблем – вроде космологической, которую будем обсуждать ниже, – аксиомы могут обладать качествами, которые можно напрямую сопоставить с наблюдаемыми физическими феноменами, но и быть совершенно абстрактными математическими или логическими понятиями, отвечающими лишь критерию непротиворечивости. Даже если превалирует второй вариант, вполне может статься, что одного требования непротиворечивости в столь очевидно сложной системе, как Вселенная, достаточно, чтобы составить уникальную и полную систему начальных условий.

Другой важный урок, усвоенный от математиков, строивших системы аксиом, заключается в том, что существует возможность измерить количество информации, содержащейся в перечне аксиом. Дело в том, что ни одна теорема не может вмещать в себя больше информации, чем содержится в системе ее аксиом. По существу, именно об этом говорит знаменитая теорема Гёделя о неполноте, ограничивающая возможности логической дедукции. Аксиомы обычной арифметики (а также любая система аксиом, включающая в себя аксиомы арифметики) содержат меньше информации, чем некоторые арифметические формулы, поэтому на основе данной системы аксиом и ассоциируемых с ними правил логического вывода нельзя судить об истинности или ложности этих формул. Заметим, однако, что система аксиом, которая не столь велика, чтобы включать в себя арифметику целиком, не страдает от гёделевой неполноты. Например, так называемая арифметика Пресбургера с операциями сложения (но не вычитания) натуральных чисел и нуля обладает тем свойством, что все арифметические высказывания в этой системе являются выводимыми. Присущий ей уменьшенный набор аксиом содержит достаточно информации, чтобы судить об истинности или ложности всех высказываний, которые можно составить, используя словарь данной системы.

В первой главе мы ввели понятие алгоритмического сжатия как критерий определения степени случайности математических выражений.

Теперь вновь воспользуемся этой концепцией, чтобы заострить дискуссию. Доказать случайность определенной последовательности чисел нельзя, но подтвердить неслучайность можно, просто отыскав вероятность сжатия. Минимальное сжатие, возможное для логической системы, как раз и соответствует аксиоматике этой системы. Становится понятным, почему в системе не может быть теоремы, которая имела бы большее информационное содержание по сравнению с аксиомами.

Таким образом, понятие аксиом не такое простое, как казалось. При выборе определенного набора вопрос о независимости аксиом друг от друга бывает очень тонким и непростым. Существует классический пример такого рода, представляющий одну из неразрешенных математических проблем. Речь идет о континуум-гипотезе. До появления трудов Георга Кантора в середине XIX века математики отрицали существование актуальной (реальной) бесконечности. По словам одного знаменитого ученого, понятие бесконечности внушало им отвращение. Гаусс писал по этому поводу:

"Я протестую против употребления бесконечной величины как чего-то завершенного, что в математике совершенно недопустимо. Бесконечность не нужно понимать буквально, когда речь идет собственно о пределе, к которому сколь угодно близко приближаются определенные отношения, когда другие принимаются неограниченно возрастающими".

Речь идет о том, что бесконечность ни при каких обстоятельствах не может быть реальным выражением, это лишь удобное условное обозначение для величины, которая может быть сколь угодно большой. Но Кантор стал обращаться с бесконечностью как с любыми другими математическими величинами и создал целый набор бесконечных множеств. Наименьшим из них было множество натуральных чисел (1, 2, 3, 4, 5...), получившее обозначение $\aleph_0$ (алеф-нулевое). Любое другое бесконечное множество называют имеющим тот же размер (точнее, *мощность*, или *кардинальное число*), что и $\aleph_0$, если его члены находятся во взаимно-однозначном соответствии с натуральными числами, то есть если их можно систематически пронумеровать. Например, бесконечное множество, состоящее из четных чисел (2, 4, 6, 8, 10...), легко нумеруется. Взаимно-однозначное соответствие между этим множеством и множеством натуральных чисел показано на рисунке 3.1а. На иллюстрации 3.1б стрелками показано, как можно расположить все рациональные дроби, чтобы пронумеровать их одну за другой, ничего не пропустив. Это свидетельствует о наличии взаимно-однозначного соответствия между $\aleph_0$ и

множеством рациональных чисел через последовательность 1/1, 2/1, 1/2, 1/3, 2/2, 3/1, 4/1, 3/2, 2/3, 1/4, 1/5, 2/4, 3/3, 4/2, 5/1, 6/1, 5/2, 4/3 и т. д. до бесконечности. Отсюда следует, что совокупность рациональных дробей представляет собой бесконечное множество точно такой же мощности, как и множество натуральных чисел. На первый взгляд результат покажется удивительным, ведь рациональные числа расположены на числовой оси гораздо плотнее, чем целые, так что дробей в процессе подсчета должно быть гораздо больше, чем целых чисел. Но это происходит оттого, что мы слишком много внимания уделяем порядку расположения чисел на оси. А когда мы выстраиваем взаимно-однозначное соответствие между дробями и натуральными числами, привычный порядок чисел нарушается, и, поскольку каждая дробь выражается парой целых чисел, таких пар должно быть ровно столько же, сколько самих чисел.

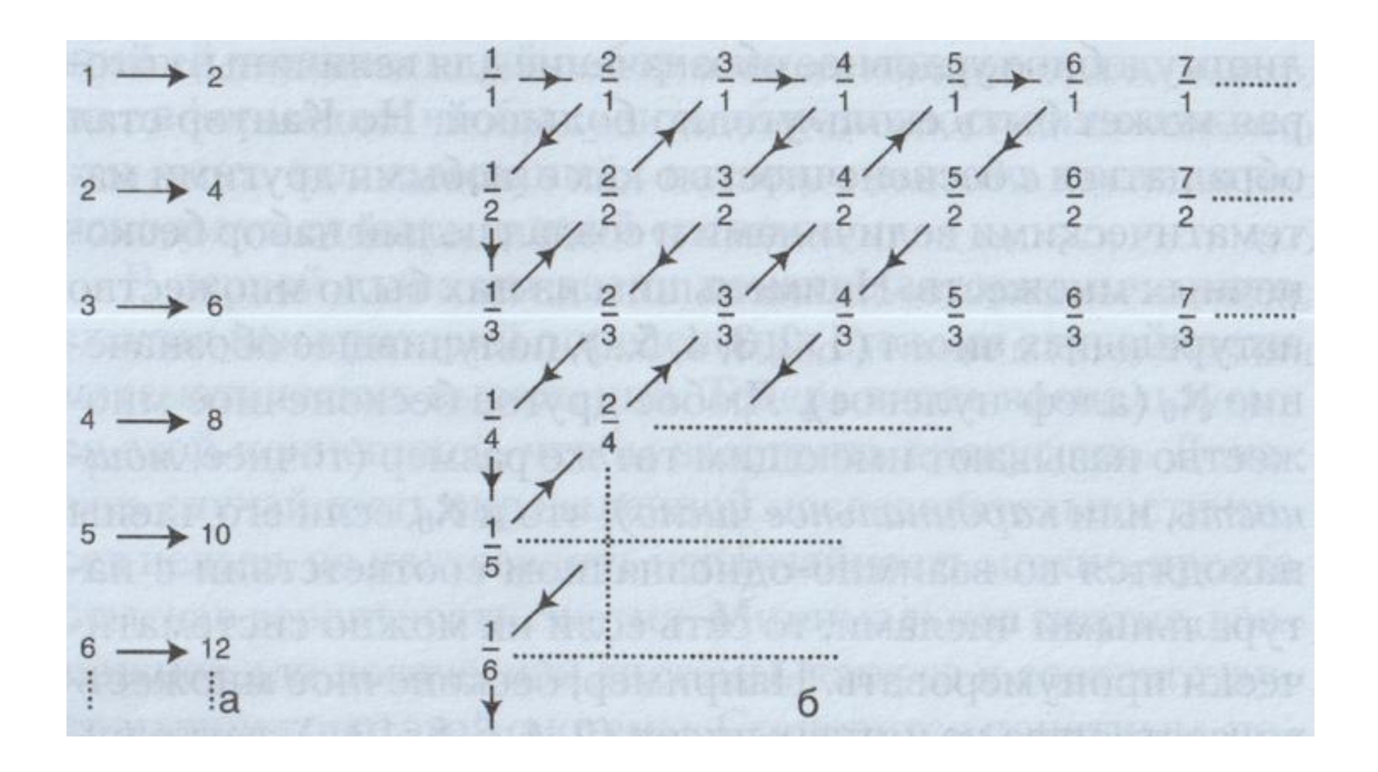


Рисунок 3.1. (а) – четные положительные числа образуют множество, имеющее точно такой же "размер", что и множество натуральных чисел, потому что существует взаимно-однозначное соответствие между этими множествами. Это означает, что четные числа можно систематически "пересчитать" (пронумеровать); (б) – множество рациональных чисел тоже связано взаимно-однозначным соответствием с множеством натуральных чисел, а значит, дроби можно систематически пронумеровать, если расположить их в указанном порядке, а затем считать до бесконечности в порядке, указываемом стрелками.

Но если мы попытаемся пересчитать не только простые дроби, но и десятичные, то сразу почувствуем, что ситуация резко меняется, потому что десятичных дробей гораздо больше, чем простых. Размерный скачок, которым характеризуется переход от натуральных чисел к вещественным (десятичным дробям), сравним с переходом из множества, содержащего только единицу и ноль, к множеству больших чисел. Для осуществления такого перехода требуется дополнительная информация, потому что число 2 из 0 и 1 можно получить только одним способом: сложить две единицы, но для этого нужно заранее знать такое понятие, как "два".

Кантор показал, что любые попытки сосчитать (пронумеровать) вещественные числа (бесконечные десятичные дроби) обречены на провал. Множество вещественных чисел имеет большее кардинальное число по сравнению с множеством натуральных чисел, поэтому построить взаимно-однозначное соответствие между этими множествами невозможно. Доказать это он смог с использованием хитроумного метода, связанного с понятием диагонального числа. Для иллюстрации представим себе четыре четырехзначных числа:

1234
5678
9012
3456

Диагональным числом в данном случае будет 1616, и оно не равно ни одному из четырех первоначальных чисел. Кантор показал, что, если составить такую же схему из чисел бесконечной длины, всегда можно составить диагональное число, не совпадающее ни с одним из использованных чисел. Для простоты будем рассматривать вещественные числа между 0 и 1 (хотя с точки зрения доказательства не имеет никакого значения добавление любых других чисел) и допустим, что существует возможность пронумеровать вещественные числа. Предположение, как показал Кантор, приводит к противоречию. Итак, представим, что мы можем выписать все существующие вещественные числа и взаимно-однозначно сопоставить им натуральные номера. Пусть наш список чисел начинается так:

1. 0,234566789...
2. 0,575603737...
3. 0,463214516...
4. 0,846216388...
5. 0,562194632...

6. 0,466732271...

и т. д. до бесконечности. Теперь возьмем получившееся диагональное число:

0,273292...

Затем увеличим каждую из его цифр на 1 и получим еще одно вещественное число:

0,384303...

Это новое число не может фигурировать в первоначальном списке, потому что отличается хотя бы одной цифрой от каждого из них*. От первого числа в списке – цифрой первого разряда, от второго числа – цифрой второго разряда и т. д. Поэтому, вопреки нашему исходному допущению, первоначальный список не может содержать все возможные вещественные числа. Отсюда следует, что наше предположение о том, что вещественные числа можно систематически пересчитать, было ложным. Множество вещественных чисел имеет большую мощность по сравнению с множеством натуральных, и она обозначается $\aleph_1$ (алеф-первый).

Кантор поднял интересный вопрос: существуют ли бесконечные множества промежуточной мощности между натуральными и вещественными числами? Сам ученый считал, что таких множеств нет, но доказать не смог. Это предположение и называют континуум-гипотезой. Она остается недоказанной по сей день. Однако Курт Гёдель и его молодой американский коллега Пол Коэн продемонстрировали несколько глубоких и необычных фактов, связанных с данной гипотезой. Гёдель показал, что, если принять континуум-гипотезу в качестве дополнительной аксиомы в придачу к стандартному набору аксиом теории множеств**, это не вызовет никаких логических противоречий. А Коэн в 1963 году продемонстрировал, что континуум-гипотеза не зависит от других аксиом теории множеств (аналогично тому, как постулат Евклида о параллельных прямых не зависит от других аксиом планиметрии), а потому не может быть ни подтверждена, ни опровергнута на основе этих аксиом.

* Во избежание возможных разночтений и недоразумений в отношении чисел, десятичная запись которых заканчивается 9 в периоде, надо иметь в виду, что, скажем, 0,2399999... и 0,2400000... суть одно и то же число. Его можно представить в виде простой дроби 24/100.

** Семь аксиом стандартной теории множеств, из которых фактически выводится вся математика (а значит, и математический аппарат физики), таковы: 1) аксиома объемности: два множества равны тогда и только тогда, когда они содержат одни и те же элементы; (*продолжение на следующей странице*)

Главный урок в том, что математические аксиомы даже больше похожи на начальные условия для физических законов, чем мы могли предполагать. Более того, некоторые надеются, что они вообще окажутся эквивалентными понятиями: что основными допущениями в отношении вводимых начальных условий для единой теории поля являются те, которые необходимы для обеспечения логической непротиворечивости. Но мы должны также понимать, что природа этих аксиом и взаимосвязь между ними – вопросы очень тонкие. По идее, мы вольны выбирать любые начальные допущения, которые отвечают нашим потребностям. Но в отсутствие очевидных интуитивных ориентиров в плане полезности и пригодности далеких от очевидности аксиом (таких как континуум-гипотеза) откуда нам знать, следует их включать или нет? Под влиянием этой затянувшейся драматической истории Алонсо Черч писал:

> "Если бы пришлось выбирать между соперничающими теориями множеств, а не просто параллельно разрабатывать математические последствия каждой из теорий, то единственной основой для выбора был бы, пожалуй, тот же самый информационный критерий простоты, на основе которого делается выбор между соперничающими физическими теориями, когда все они в равной мере объясняют экспериментальные факты".

Доказанная Коэном независимость континуум-гипотезы от других аксиом теории множеств означает, что мы в равной мере вольны включить в существующую систему аксиом как саму эту гипотезу, так и ее отрицание. В любом случае мы получим то или иное расширение теории множеств, так же как замена евклидова постулата о параллельных прямых его отрицанием

** *(продолжение с предыдущей страницы)* 2) аксиома подмножеств: для множества S и свойства f существует подмножество, содержащее те и только те элементы S. которые обладают свойством f; 3) аксиома пар: для любых двух различных множеств существует третье множество, содержащее только элементы первых двух множеств; 4) аксиома объединения: если есть множество S, элементы которого сами являются множествами, тогда существует множество (называемое объединением множества S), элементами которого являются элементы эле-ментов S; 5) аксиома бесконечности: существует хотя бы одно бесконечное множество (например, множество натуральных чисел 1, 2, 3...); 6) аксиома степени: для любого множества S существует другое множество, элементы которого являются подмножествами S; 7) аксиома выбора: для любого непустого семейства S попарно непересекающихся множеств существует множество, содержащее только по одному элементу, взятому из каждого множества семейства S. Именно об этих аксиомах Курт Гёдель сказал: "Несмотря на их удаленность от чувственного опыта, у нас есть что-то вроде восприятия также и для объектов теории множеств, что видно из того факта, что данные аксиомы буквально напрашиваются в качестве истины. Я не вижу никаких причин, почему мы должны меньше доверять этому виду восприятия, то есть математической интуиции, чем чувственным формам восприятия... Они тоже могут отображать аспекты объективной реальности".

привела к созданию логически непротиворечивой неевклидовой геометрии. С точки зрения математического платониста, верящего в реальное существование абстрактных математических понятий, реально существовать может только одна из двух взаимоисключающих теорий множеств, однако для конструктивиста или формалиста они являются равноправными порождениями разума.

Есть важная точка соприкосновения между фундаментальной физикой и базовыми вопросами, касающимися бесконечности: существует ли в реальности истинный континуум (то есть является ли мир непрерывным)? Наиболее фундаментальные представления о физическом мире подразумевают, что такие базовые понятия, как поле, пространство и время, являются непрерывными, а не дискретными. Противостояние дискретности и непрерывности давно порождает горячие споры в сфере естествознания, и в каждой эпохе оно приобретает специфическую окраску. С точки зрения структуры любой теории бесконечности самый важный момент связан с тем, что непрерывные и дискретные "теории всего" очень сильно различаются по своей сложности. Дело в том, что число непрерывных преобразований, существующих между двумя множествами вещественных чисел, на целый порядок бесконечности меньше, чем общее число возможных преобразований, не ограниченных требованием непрерывности. Последнее позволяет на удивление резко сократить диапазон рассматриваемых преобразований. Поскольку непрерывные преобразования включают в себя каталог возможных соотношений, из которых можно вывести класс преобразований (или уравнений), называемых физическими законами, становится очевидным, что разрывный мир в потенциале является гораздо более сложным. Он менее ограничен в допустимых возможностях. В настоящее время ученые, пылая страстью к симметрии, строят только непрерывные модели фундаментальной физики. Но не исключено, что однажды у них появится мотив обратиться к рассмотрению возможных структур фундаментально дискретного мира. В главе 9 мы рассмотрим некоторые из идей, которые могли бы подтолкнуть нас к такому шагу.

Возможность доказать или опровергнуть те или иные высказывания очень сильно зависит от информационного содержания используемых аксиом. Некоторые философы науки используют теоремы Гёделя, касающиеся неполноты арифметики (а значит, любой логической системы, содержащей арифметику), как аргумент в пользу того, что мы никогда не сможем знать все о физической Вселенной в части математических законов природы.

Математическое джиу-джитсу

Никакая другая математическая теорема не пробуждала столько интереса у не-математиков, как теорема Гёделя о неполноте... Упоминания о ней можно услышать не только от тех, кто обсуждает вопросы логики, математики, методов вычислений или философии (где это вполне ожидаемо), но также в дискуссиях на темы политики, религии, атеизма, поэзии, эволюции, хип-хопа, любовных свиданий и всего прочего.

Торкель Францен

Монументальная теорема Гёделя, показавшего, что сложные математические системы сами себя ограничивают в том, что они способны доказать, привела к постепенному изменению мировоззрения философов, ученых и наших методов познания мира. На поверхности все выглядит так, словно исследования Вселенной должны иметь некий предел. Наука базируется на математике; последняя не способна открыть все истины; следовательно, наука не способна открыть все истины. Этот аргумент часто приходится слышать. Один из современников Гёделя, известный математик Герман Вейль писал об открытии Гёделя как о кризисе, который "постоянно подтачивал энтузиазм и решимость", с которой он занимался своими исследованиями. И даже в сравнительно недавнее время философ Стэнли Яки, работающий на стыке богословия и науки, утверждал, что теорема Гёделя не позволяет нам познать космос как необходимую истину:

> "Ясно, что никакая научная космология, которая по необходимости должна в огромной степени опираться на математику, не может доказать собственную непротиворечивость в своей математической части. В отсутствие такой непротиворечивости никакие математические модели, никакие теории элементарных частиц, включая теорию кварков и глюонов... не могут претендовать на роль теории, которая в силу своей априорной истинности могла бы доказать, что мир может быть только таким и никаким другим. Это сохраняет силу даже в том случае, если найдется теория, которая с идеальной точностью описывает все физические феномены, известные на данный момент".

А это значит, что путь человечества к познанию Вселенной преграждает непреодолимый барьер:

> "Из теоремы Гёделя, по-видимому, следует, что самые нижние основания смелых символических конструкций математической физики продолжают опираться на тот глубинный уровень мышления, который характеризуется мудростью и одновременно туманностью аналогий и интуитивных предположений. Для склонного к отвлеченным размышлениям физика это означает, что точные и определенные знания имеют свой предел, что даже в чисто умозрительных физических теориях есть своя граница, переступить которую нельзя... И неотъемлемой частью этой границы является сам ученый как мыслитель".

Чтобы показать, какую важную роль в оценке значимости этих границ играет психология, некоторые другие ученые, в том числе Фримен Дайсон, признают, что теорема Гёделя ограничивает нашу способность открывать математические и естественнонаучные истины, но интерпретируют это как гарантию того, что наука будет развиваться вечно. Дайсон, одно время работавший с Гёделем в Институте перспективных исследований Принстонского университета, видит в теоремах о неполноте страховой полис против того, что наука, которую он так любит, когда-нибудь все откроет и станет ненужной. Ведь

> "Гёдель доказал, что мир абстрактной математики неисчерпаем; никакое конечное число аксиом и логических правил не в состоянии охватить всю математику; какую ни возьми систему аксиом, всегда остаются вопросы, на которые эти аксиомы не могут дать ответа. Я надеюсь, что аналогичная ситуация существует и в мире физики. Если мой взгляд на будущее верен, то мир физики и астрономии тоже неисчерпаем; не важно, сколько пройдет времени, – мы всегда будем наблюдать новые явления и получать новую информацию; всегда будут появляться новые миры, которые можно исследовать, – постоянно расширяющиеся территории жизни, сознания и памяти".

В этих двух непохожих друг на друга заявлениях мы видим оптимистическую и пессимистическую реакции на открытия Гёделя. Для оптимистов вроде Дайсона теоремы Гёделя – гарантия того, что развитие науки – процесс нескончаемый. Поиск – необходимая часть человеческого духа. Возможность того, что однажды искать и исследовать станет нечего, имела бы катастрофический демотивирующий эффект. Пессимисты

наподобие Яки интерпретируют утверждения Гёделя как доказательство неспособности человеческого разума открыть все тайны природы. Они делают упор на обладание знаниями и на их применение, а не на процесс поиска и приобретения. Последние не согласны с тем, что основная польза от науки для человечества заключается как раз в самом процессе поиска знаний, а не в обладании ими.

Мы не должны особо удивляться таким диаметрально противоположным реакциям. В жизни многое имеет разбежки в оценках. Все зависит от того, как вы привыкли видеть стакан – наполовину полным или наполовину пустым. Точка зрения самого Гёделя была, как всегда, неожиданной. Он считал, что придет время, когда ученые будут относиться к интуиции как к инструменту познания, при помощи которого мы способны увидеть математические и естественнонаучные истины, с таким же уважением и формализмом, с каким они относятся к логике:

> "Я не вижу никаких причин, почему этому виду восприятия, то есть математической интуиции, мы должны доверять меньше, чем его чувственным формам, которые приводят нас к построению физических теорий и ожиданию, что будущий чувственный опыт согласуется с ними, а также к убеждению, что вопросы, не разрешимые сейчас, имеют смысл и будут разрешены впоследствии".

Сам Гёдель не был расположен делать из своих теорем о неполноте далеко идущие выводы применительно к физике. Он не видел связи собственных открытий с принципом неопределенности квантовой механики, еще одним открытием, которое ограничивает нашу способность познавать мир и было сформулировано Гейзенбергом всего лишь за несколько лет до того, как Гёдель доказал свою первую теорему. Более того, Гёдель вообще враждебно относился к квантовой механике как к науке. Те, кто работал с ним в одном институте (сказать, что кто-то работал с ним, никак невозможно), считали это неприятие следствием его частых бесед с Эйнштейном, который, по словам Джона Уилера (хорошо знавшего их обоих), "промывал мозги" Гёделю и внушал недоверие к квантовой механике и принципу неопределенности. Грег Чейтин записал рассказ Уилера об однажды имевшей место попытке вызвать Гёделя на разговор о связи между открытой им неполнотой и принципом неопределенности Гейзенберга:

> "Однажды я оказался в Институте перспективных исследований и зашел к Гёделю в кабинет. Это было зимой, и Гёдель сидел перед

электрическим обогревателем, завернув ноги в плед. Я сказал: “Профессор Гёдель, какую вы видите связь между вашей теоремой о неполноте и принципом неопределенности Гейзенберга?” А Гёдель рассердился и выгнал меня!"

Таким образом, аргумент, что раз математика содержит недоказуемые высказывания, а физика базируется на математике, значит, физика не способна открыть все истины, довлеет над нами уже давно. Не отвергая эти тревоги, все-таки рассмотрим, как открытия Гёделя могут отразиться на физической науке. Ситуация здесь не настолько ясная, как хотят нам внушить некоторые исследователи. Начнем с разбора предпосылок, на которых строится вывод Гёделя о неполноте. Теорема Гёделя гласит, что если формальная система

1) финитно определенная;
2) настолько широкая, что включает в себя арифметику;
3) логически непротиворечивая,

то она неполная.

Условие 1 означает, что система аксиом не должна образовывать несчетное множество. Мы не можем, например, выбрать систему, состоящую из всех истинных высказываний об арифметике, потому что такую систему нельзя уместить в финитный перечень аксиом в требуемом смысле.

Условие 2 значит, что формальная система включает все символы и аксиомы, используемые в арифметике. Символами являются: о ("ноль"), S ("следующее число"), "+", "x" и "=". Так, число "два" следует за тем, что следует за "нулем", и потому символически записывается в виде *терма* SSo, а выражение "два плюс два равно четыре" можно записать как SSo + SSo = SSSSo.

Структура арифметики играет центральную роль в доказательстве теоремы Гёделя. Ученый использовал особые свойства чисел, такие как простота и тот факт, что любое число может быть единственным способом разложено на простые множители, чтобы установить важнейшую взаимосвязь между математическими высказываниями и высказываниями о математике. Таким образом можно внедрить в структуру самого математического выражения такие лингвистические парадоксы, как парадокс лжеца, играющий роль троянского коня. Только логические системы, которые достаточно богаты, чтобы включать в себя арифметику,

дозволяют подобные "кровосмесительные" высказывания о самих себе, закодированные на собственном языке.

Поучительно будет рассмотреть ситуации, когда эти требования не удовлетворены. Если взять теорию, в которой используются только первые 10 чисел (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) и применяются правила арифметики по модулю 10, то условие 2 нарушается, и такая мини-арифметика окажется полной. Арифметика оперирует термами, то есть конкретными числовыми выражениями (как, например, SSo). Если в системе нет индивидуальных термов, но есть, как в евклидовой геометрии, высказывания в отношении континуума точек, прямых и окружностей, условие 2 не может выполняться. И потому, как это первым показал Альфред Тарский, евклидова геометрия является полной. Впрочем, связи с какими-то магическими особенностями планиметрии нет: неевклидовы геометрии, строящиеся на искривленных поверхностях, тоже полны. Аналогичным образом, если взять логическую теорию, использующую числа, к которым применяются только понятия "больше" и "меньше" без указания их конкретных величии, такая система будет полной: мы способны определить истинность или ложность любых высказываний о том, что больше чего.

Другой пример системы, которая меньше обычной арифметики, – это арифметика без операции умножения. Ее называют арифметикой Пресбургера (а полную арифметику называют арифметикой Пеано – в честь ученого, который в 1889 году первым дал ее аксиоматическое описание). На первый взгляд звучит странно – ведь из повседневной жизни мы знаем, что умножение есть всего лишь краткая форма сложения (например: 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 = 2х6), но в полной логической системе арифметики, в присутствии таких логических кванторов, как "существует" или "для любого", операция умножения позволяет строить высказывания, отнюдь не эквивалентные последовательному сложению.

В своей докторской диссертации Гёдель доказал полноту арифметики Пресбургера: любые высказывания насчет сложения натуральных чисел можно доказать или опровергнуть; все истины могут быть выявлены на основе существующих аксиом. Подобным же образом можно создать другую, "обрезанную" версию арифметики – например, содержащую умножение, но не имеющую сложения, – и она тоже будет обладать свойством полноты. И только когда умножение и сложение присутствуют одновременно, возникает неполнота. Арифметика является своего рода

водоразделом: неполнота появляется в системе, сложность которой больше или равна сложности арифметики.

Использование теоремы Гёделя как фактора, ограничивающего возможности математической теории физики (или чего-либо другого), на первый взгляд может показаться достаточно простым и прямолинейным следствием. Но если рассмотреть вопрос внимательнее, все не так просто. Предположим, что все условия выполнения теоремы Гёделя наличествуют. Как будет практически выглядеть декларируемая теоремой неполнота? Представим себе физическую теорию, которая раз за разом точно предсказывает широчайший ряд наблюдаемых феноменов – будь то стандартная модель или теория струн. И вот однажды мы с удивлением сталкиваемся с фактом, о котором теория ничего сказать не может. Наблюдаемое явление попросту не укладывается в рамки теории. В этой связи есть примеры из физики элементарных частиц, связанные с теорией великого объединения. В некоторых ранних ее версиях предполагалось, что все нейтрино должны иметь нулевую массу. Когда же экспериментально были обнаружены нейтрино с ненулевой массой, стало понятно, что новая ситуация никак не укладывается в рамки старой теории. Что делать? Сталкиваясь с тем или иным проявлением неполноты, мы пытаемся расширить или модифицировать теорию, чтобы она охватывала и вновь открывшиеся возможности. Таким образом, на практике математическая неполнота проявляется как неадекватность теории.

Вернемся к арифметике. Если какое-то арифметическое предложение оказывается неразрешимым (есть такие высказывания, истинность и ложность которых противоречат аксиомам арифметики), тогда у нас есть два пути. Мы можем создать две новые арифметики: одна включает неразрешимое предложение в систему аксиом, а другая причисляет к аксиомам отрицание высказывания. Разумеется, новые арифметики останутся неполными, но их всегда можно продолжать расширять для компенсации обнаруживаемой неполноты. Получается, что на практике физическую теорию всегда можно расширить, добавляя новые принципы, которые изгоняют всякую неразрешимость в дальние углы мира математики, не имеющие никакого физического проявления. Стало быть, неполную физическую теорию всегда очень трудно, если вообще возможно, отличить от теории неправильной или неадекватной.

Интересный пример такой дилеммы можно обнаружить в истории математики. В XVI веке ученые занялись исследованием вопроса, что будет,

если складывать бесконечный ряд чисел. Если числа в ряду увеличиваются, такой ряд "расходится", то есть его сумма приближается к бесконечности, по мере того как бесконечно растет количество слагаемых. Пример такого ряда:

1 + 2 + 3 + 4 + 5 + ... = бесконечность.

Однако если члены ряда достаточно быстро уменьшаются, стремясь к нулю*, сумма нарастающего количества слагаемых может приближаться к конечному предельному значению, которое и называют суммой бесконечного ряда. Например:

$1 + 1/9 + 1/25 + 1/36 + 1/49 + \ldots = \pi^2/8 = 1{,}2337005.$

Но следующий пример бесконечного ряда заставил математиков изрядно побеспокоиться:

1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 ... = ?????

Если мы распределим члены ряда попарно, он будет выглядеть так: (1 – 1) + (1 – 1) + ... и т. д. А это то же самое, что 0 + 0 + 0 +... = 0, то есть сумма равна нулю. С другой стороны, этот же ряд можно записать так: 1 – {1 – 1 + + 1 – 1 + 1 –...}, и получается 1 – {0} = 1. Выходит, мы доказали, что 0=1.

Сталкиваясь с подобными двусмысленными рядами, математики реагируют по-разному: вообще отвергают бесконечность и имеют дело только с конечными суммами или, как показал в начале XIX века Коши, определяют сумму рядов, аналогичных рассмотренному выше, за счет более четкого уточнения, что понимается под суммой. Предельное значение бесконечной суммы должно указываться вместе с процедурой, используемой для расчета. Противоречие 0 = 1 возникает только тогда, когда мы забываем уточнить, с помощью какой конкретно процедуры производился расчет. В обоих случаях процедуры использованы разные, поэтому ответы не совпадают. Таким образом, здесь мы видим простой пример того, как можно обойти возникшие ограничения за счет расширения самой концепции, которая как будто и породила эти ограничения. Можно последовательно разобраться с каждым расходящимся рядом, подходящим образом корректируя и расширяя понятие суммы ряда.

* Стремление к нулю является необходимым, но не достаточным для сходимости бесконечного ряда. Например, сумма ряда 1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + … является бесконечной.

Еще одна возможность, очень похожая на правду, заключается в том, что законы природы используют только разрешимую часть математики. Мы знаем, что она представляет собой бескрайнее море всевозможных структур. Лишь некоторые из этих структур и конфигураций находят воплощение в физическом мире. И только единицы используются для описания законов природы. Вполне возможно, что все они относятся к подмножеству выводимых истин.

Возможно также, что условия, необходимые для доказательства теоремы Гёделя о неполноте, неприменимы к физическим теориям. Условие 1 требует, чтобы множество аксиом было счетным. Вполне может статься, что физические законы не образуют счетное множество в этом специальном смысле. Это означало бы радикальный отход от той ситуации, какую мы себе представляем, поскольку принято считать, что число фундаментальных законов является не просто счетным, но конечным (и очень маленьким). Однако всегда сохраняется возможность – мы обозреваем лишь поверхность бездонного колодца законов, только верхний слой которого оказывает сколько-нибудь заметное влияние на нашу жизнь. Но если действительно имеет место несчетная бесконечность законов природы, тогда мы имеем дело с проблемой куда более серьезной, нежели неполнота.

Не менее интересный вопрос насчет финитности. Вполне может статься, что мир физических возможностей конечен, хоть и астрономически велик. Однако, как бы ни было велико число начальных величин, на которые ссылаются законы, пока это число остается конечным, результирующая система взаимосвязей будет логически полной. Необходимо подчеркнуть, что, хотя мы привычно предполагаем, что точки пространства-времени образуют континуум, это всего лишь очень удобный тезис, призванный упростить математический аппарат. Нет сколько-нибудь глубоких причин считать, что пространство-время на самом фундаментальном, микроскопическом уровне не дискретно, а образует сплошную, непрерывную среду. Более того, существует несколько теорий квантовой гравитации, которые строятся на противоположной предпосылке. Квантовая теория вообще ввела дискретность и финитность во многие области, где мы прежде свято верили в континуум возможностей. Любопытно отметить, что, отказавшись от непрерывности и допустив отсутствие других точек между двумя достаточно близко взятыми точками пространства-времени, структура последнего становится гораздо более сложной. Появляется возможность существования и иных феноменов. Вопрос о финитности Вселенной граничит также с проблемой ее конечного объема и числа элементарных частиц (или

каких-то еще более элементарных единиц). Как бы то ни было, существует возможность того, что число термов, к которым применима фундаментальная логическая теория физической Вселенной, является конечным. В этом случае она будет полной.

Интересная перспектива в плане применения открытий Гёделя к физическим законам связана с невыполнением второго условия теоремы о неполноте. Как это может быть? Хотя мы широко пользуемся арифметикой и гораздо более крупными математическими структурами, когда занимаемся научными исследованиями, это не значит, что внутренняя логика физической Вселенной не могла бы обойтись без использования этих громоздких структур. Нам, может быть, удобнее пользоваться такими крупными математическими структурами наряду с концепциями бесконечности, но это все может быть антропоморфизмом. Не исключено, что глубинная логика структуры Вселенной более проста, чем логика стандартной арифметики, а значит, является полной. Для этого нужно, чтобы эта фундаментальная система включала операцию сложения или умножения, но не то и другое вместе. Вспомните, что во всех арифметических вычислениях, которые вы делали, операция умножения представляла собой лишь сокращенную форму многократного сложения. Все это позволительно было бы делать и в рамках арифметики Пресбургера. В качестве альтернативы можно представить базовую структуру реального мира, которая соткана из простых геометрических соотношений, или построена на соотношениях "больше" – "меньше", или использует хитроумные комбинации всех этих соотношений и при этом остается полной, хотя доказательства становятся более длинными. Тот факт, что общая теория относительности Эйнштейна заменяет многие физические понятия, такие как сила и вес, геометрическими искривлениями пространства-времени, отчасти намекает на скрывающиеся здесь возможности.

Если математическая система полная, законы физики могут выводиться через нее, но на практике нас всегда больше волнует не полнота системы, а ее правильность. Тарский показал, что, в отличие от арифметики натуральных чисел, теория вещественных чисел первого порядка с операциями сложения и умножения разрешима. Этот достаточно удивительный результат вселяет надежду, что физические теории, основанные на вещественных и комплексных числах, смогут избежать неразрешимости. Многие математические системы, используемые в физике, такие как теория решеток, проективная геометрия и теория абелевых групп,

также являются разрешимыми, хотя некоторые другие, такие как теория неабелевых групп, неразрешимы.

Необходимо иметь в виду и еще один важный аспект ситуации. Даже если логическая система полна, она всегда содержит недоказуемые истины. Это аксиомы, которые выбраны для формирования системы и предполагаются независимыми и непротиворечивыми. Из них можно только делать выводы. В простых логических системах, таких как арифметика Пеано, аксиомы выглядят достаточно очевидными, потому что мы здесь крепки задним умом – формализуем то, что интуитивно знали и делали уже тысячи лет. И когда затем рассматриваем такой предмет, как физика, видим там и параллели, и отличия. Аксиомы, или законы, физики – главный объект научного исследования. Они никоим образом не являются интуитивно очевидными, потому что управляют системами, которые выходят далеко за пределы нашего жизненного опыта. Результаты действия этих законов в определенных обстоятельствах непредсказуемы, потому что предполагают нарушения симметрии. Пытаться вывести законы из результатов – это не та задача, которую можно полностью и однозначно решить с помощью компьютерной программы.

Таким образом, в изучении формальных систем и физики мы обнаруживаем совершенно разные акценты. В математике и логике начинаем с введения системы аксиом и правил вывода. Затем можем попытаться доказать полноту или неполноту получившейся системы и вывести из аксиом как можно больше теорем. Физики не вольны выбирать систему законов, какую им захочется. Они пытаются найти законы и аксиомы (предполагая, что такие есть), которые обеспечат результаты. Всегда можно найти систему, гарантирующую любое наблюдаемое множество результатов. Но если математики и логики саму систему недоказуемых высказываний игнорируют, то для физиков она и представляет главный интерес; именно ее они хотят открыть, а не просто предполагать. Действовать, как логик, физик мог бы только в одном случае: если бы существовал лишь один возможный набор аксиом, или физических законов, который включал бы в себя все известные нам силы природы.

В качестве промежуточного итога можно утверждать, что у нас нет оснований верить в то, что теорема Гёделя накладывает реальные ограничения на нашу способность отыскать высший закон природы – "теорию всего". Физика использует математику только выборочно, и эта часть может относиться к категории разрешимых. Более того,

математический аппарат выражения известных физических законов ограничивается самыми простыми моделями, которым свойство неразрешимости не грозит.

Однако при всей простоте физических законов результаты их действия далеко не просты. Они сложны и лишены симметрии, и часто приходится оказываться в ситуации, когда мы имеем закон в форме системы уравнений, но не можем их решить, чтобы узнать результаты действия этого закона.

И вот как раз здесь, в мире сложных результатов известных законов, теорема Гёделя о неполноте может поднять голову. Мы уже знаем целый ряд вопросов о Вселенной, которые обречены оставаться без ответа из-за этой самой неполноты. Они не ограничивают нас в познании законов природы, но не дают воспользоваться ими, чтобы ответить на некоторые простые вопросы.

Речь идет о конкретных примерах неразрешимых физических проблем. Как можно ожидать из только что сказанного, вопрос не связан с нашей неспособностью познать фундаментальные законы или природу элементарных частиц материи. Речь идет о невозможности произвести некоторые математические расчеты, что не позволяет нам выяснить ход событий, связанный с четко обозначенной проблемой. Хотя затруднение математически четко очерчено, это еще не значит, что можно обеспечить точные условия, необходимые для существования неразрешимости.

Интересный ряд примеров такого рода был предложен бразильскими математиками Франсишку Дориа и Ньютоном да Кошта. Откликнувшись на вызов, брошенный российским математиком Владимиром Арнольдом, они исследовали вопрос о возможности выработки общего математического критерия устойчивого равновесия. Устойчивое равновесие – это ситуация, когда шарик располагается в ямке: толкните его – и он, качнувшись, вернется на место. Неустойчивое равновесие – это вертикально поставленная спица: достаточно малейшего шевеления, чтобы спица упала. Задачу с простой природой равновесия решит даже студент-первокурсник. Но когда равновесие существует в окружении сложных конкурирующих воздействий, найти ответ гораздо сложнее. Пока сил, воздействующих на находящуюся в равновесии систему, немного, с проблемой можно справиться, составив и решив соответствующую систему уравнений. Поставленная Арнольдом задача – открыть алгоритм, который сказал бы нам, всегда ли затруднение разрешимо или все зависит от количества конкурирующих сил воздействия и сложности их взаимоотношений. Под "открыть" имелось в виду найти

формулу, в которую можно было бы вводить уравнения, описывающие равновесное состояние, и ваше определение устойчивости, чтобы на выходе получить конкретный ответ: устойчивая или неустойчивая.

Поразительное дело, но да Кошта и Дориа открыли, что такой алгоритм вообще невозможен. Существуют равновесные состояния, характеризуемые особыми решениями математических уравнений, чья устойчивость неразрешима в принципе. Чтобы неразрешимость отразилась на проблемах, представляющих реальный интерес для математической физики, равновесная система должна включать в себя очень большое число различных сил. Хотя полностью возможность возникновения таких ситуаций исключить нельзя, до сих пор в реальных физических задачах они не возникали. Да Кошта и Дориа пошли дальше и идентифицировали сходные проблемы, где простой вопрос типа "Станет ли орбита частицы хаотичной?" остается без ответа.

Из этой дискуссии мы должны сделать следующий предварительный вывод: из того, что физика использует математику, еще не следует автоматически, что теоремы Гёделя напрямую накладывают ограничения на наши возможности познания физических законов Вселенной, но существуют вопросы, касающиеся некоторых результатов их действия, на которые мы, по-видимому, никогда не сможем ответить.

Начальные условия и симметрия времени

Историк – это пророк, смотрящий в прошлое.

Август фон Шлегель

Начальные условия порой способны оказывать такое глобальное влияние на результат, что создается впечатление, будто действует какой-то совершенно новый закон. Самый известный пример – второй закон термодинамики, утверждающий, что энтропия, или уровень беспорядка, в замкнутой физической системе не может уменьшаться с течением времени. Именно поэтому мы регулярно видим, как случайно бьется вдребезги посуда, а вот чтобы она сама собиралась из кусочков в одно целое, нам

наблюдать не доводилось. Порядок на рабочем столе естественным образом превращается в беспорядок, но никак не наоборот. Однако законы механики, управляющие направлением преобразований, отнюдь не запрещают движение вспять по оси времени. Таким образом, мир, где кусочки фарфора воссоединяются и образуют целую чашку и на заваленном бумагами столе постепенно сам собой возникает порядок, известных нам законов природы отнюдь не нарушает. Причина, по которой в замкнутых системах все развивается как будто бы от плохого к худшему, заключается в том, что начальные условия, необходимые для роста уровня порядка, являются фантастически необычными и практическая вероятность их появления близка к нулю. Чтобы кусочки фарфора сложились в чашку, им всего-то и нужно двигаться с такими-то скоростями в таких-то направлениях. Условия, при которых на столе создается беспорядок, встречаются в жизни гораздо чаше, чем обстоятельства, при которых беспорядок сам собой исчезает. Таким образом, лишь высокая вероятность существования типичных условий, при которых порядок переходит в беспорядок, является причиной иллюзорного представления, что последний, дескать, диктуется физическими законами.

Этот пример со вторым законом термодинамики предупреждает нас о важности понимания начальных условий, особенно в незнакомых ситуациях. Иначе мы рискуем впасть в заблуждение и будем искать в "теории всего" объяснения, которые невозможно получить. Кроме того, мы видим, что выбор (сознательный или случайный) начальных условий определяет направление оси времени в физическом пространстве. "Стрелка", указывающая в направлении роста энтропии, есть лишь отражение невероятности тех начальных условий, которые обеспечили бы ее снижение в замкнутой физической системе.

Куда ни посмотри, во Вселенной мы всюду видим, что замкнутые физические системы все как одна развиваются в направлении полного беспорядка, называемого термическим равновесием. Это не может быть следствием известных законов природы, потому что на фундаментальном уровне они симметричны относительно оси времени – позволяют обратное развитие любой цепочки событий. Начальные условия играют решающую роль с точки зрения определения направления оси времени во Вселенной. Ниже мы будем обсуждать квантовую космологию и рассмотрим некоторые драматические последствия, вытекающие из выбора начальных условий для всей Вселенной. Нам станет ясно, что для понимания устройства наблюдаемой Вселенной не обойтись без рассмотрения начальных условий.

Любую "теорию всего" необходимо дополнять описанием независимых начальных условий, простых, естественных, экономичных или обладающих какими-то другими метафизическими свойствами, внушающими доверие. Единственная радикально отличающаяся альтернатива – это, по-видимому, поверить в то, что та форма математического описания природы, которую мы знаем и любим, – системы уравнений с начальными условиями – является лишь отражением предпочитаемых нами категорий мышления и не более чем аппроксимацией истинной природы вещей. Вполне возможно, что на глубинном уровне резкого разграничения между теми аспектами действительности, которые мы привычно называем законами и начальными условиями, нет вовсе.

Время вне времени

Нет ничего нового под солнцем.

Екклесиаст

Еще Лейбниц и Лаплас сознавали одно сбивающее с толку последствие абсолютного детерминизма. Если все законы движения записать в форме уравнений, однозначно и полно определяющих будущее из настоящего, тогда абсолютного знания исходного состояния сверхсуществу хватило бы, чтобы предсказать всю историю Вселенной. Хотя концепцию детерминизма в классической физике чаще всего приписывают Лапласу и его в основном цитируют в этой связи, более ранние и явные рассуждения на этот предмет можно найти в замечательной книге Бошковича, опубликованной в 1758 году, с которой мы уже познакомились в предыдущей главе. В отношении детерминизма и непрерывности движения он пишет:

> "Любая точка материи, если не учитывать свободные движения, возникающие под действием произвольной воли, должна описывать непрерывную кривую, определение которой можно свести к следующей общей проблеме. Дано число точек материи, и для каждой из них дана точка пространства, занимаемая ею в данный момент времени; даны направление и начальная скорость для каждой точки,

если они были только что приведены в движение, или скорость тангенциального движения, если они уже двигались; и дан закон сил, выраженный непрерывной кривой [аналогично закону сил, представленному на рисунке 2.1 в предыдущей главе]... Требуется определить траекторию движения каждой точки... Хотя задача такой сложности превосходит возможности человеческого интеллекта, однако любой геометр в состоянии понять, что она решаема... Разум, способный должным образом справиться с этой задачей и достаточно блестящий, чтобы распознать решение (а такой разум может быть финитным, учитывая финитность числа точек и данных, на основе которых построена кривая, представляющая закон сил), наверняка смог бы вывести из непрерывной кривой, описываемой всеми точками материи за определенный интервал времени, каким бы коротким он ни был, сам закон сил... Итак, если бы был известен закон сил, положение, скорость и направление всех точек в любой данный момент времени, для разума не составило бы труда предвидеть все последующие движения и состояния и предсказать все феномены, вытекающие из этих состояний".

В дальнейшем ученые уделяли немало внимания практическим вопросам достижения такого абсолютного знания, но в XX веке квантовая теория поставила под сомнение саму возможность его достижения любым наблюдателем и даже само существование такого знания в сколько-нибудь значимом смысле. Но оставим в стороне важные открытия и сосредоточимся на поразительных последствиях строго детерминированного мира Бошковича, Лапласа и Лейбница. Он остается предметом повседневных забот большинства физиков, его не затрагивает неопределенность квантовой механики.

В детерминированном мире информация о его структуре неявно заложена в начальных условиях. Существование времени является тайной. От него нет никакой пользы. Все, что может и должно произойти, с самого начала заложено и дремлет в законах и начальных условиях. Первая реакция на подобное заявление – возразить, что физические законы представляют алгоритмы предсказания будущего из прошлого. Но мы уже видели, что законы эквивалентны принципам инвариантности, то есть утверждениям, что какая-то величина остается неизменной. В "смирительной рубашке" детерминизма время кажется избыточным фактором. Все, что когда-нибудь произойдет, уже в зачатке имеется в исходном состоянии. В нашем нынешнем бытии содержится вся информация, необходимая для

реконструкции прошлого и предсказания будущего. Говоря словами Джозефа Конрада из "Сердца тьмы",

> "разум человека на все способен, ибо он все в себя включает – как прошлое, так и будущее".

Эта ситуация всегда представала перед учеными до- квантовой эры как дилемма. Когда в XIX веке велись дебаты о том, насколько вероятна дарвиновская теория эволюции в сравнении со специальным актом творения живого мира в его нынешней, чудесно адаптированной к существующим условиям форме, некоторые отмечали фундаментальную конвергенцию этих двух точек зрения, поскольку нынешнее состояние мира представляет собой не что иное, как точное отражение определенных начальных условий. Много копий было сломано по поводу проблемы проявления свободы воли. Раздумья над проблемой привели Джеймса Клерка Максвелла к призыву разграничивать детерминизм принципиальный и практический.

Существует множество ситуаций, от погоды до сердцебиения, где малейший пробел в знаниях о состоянии системы в один момент времени приводит к полной утрате информации о точной ее картине уже через очень короткое время. Два почти идентичных настоящих приводят к очень разным будущим. Такие системы называются хаотичными. Именно они являются "виновницами" многих сложностей жизни, будь то экономика, колебания ценных бумаг или изменение климатических условий. В таких ситуациях не имеет значения, насколько хорошо мы знаем правила, в соответствии с которыми происходят преобразования, потому что у нас нет возможности с достаточной точностью описать текущее положение вещей. Поэтому наша способность делать прогнозы быстро сходит на нет. Любопытно отметить, как много времени потребовалось ученым, чтобы признать ошеломляющее значение такой чувствительности к начальным условиям в реальном мире. Они были настолько ослеплены блеском точного, как часы, детерминистского мировоззрения Ньютона и проистекавшими из него технологическими прорывами, что "нерушимые законы природы" воспринимались как доминирующий фактор мироустройства. Только такие глубочайшие мыслители XIX века, как Максвелл и Пуанкаре, смогли проникнуть в истинную суть явлений и понять, почему во многих случаях мы не способны спрогнозировать будущее, даже когда нам точно известны все законы природы. Размышления Максвелла о практических аспектах проблемы свободной воли в условиях детерминизма привели его к осознанию того факта, что многие последствия естественных событий

отличаются чрезвычайно сильной зависимостью от исходных установок. Несколько позже Анри Пуанкаре предпринял попытки разобраться в чувствительной динамике движения планет Солнечной системы, и это привело его к следующей мысли:

> "Очень маленькая причина, ускользающая от нашего внимания, предопределяет значительное следствие, которое невозможно не увидеть, и тогда мы приписываем такой эффект случайности. Если бы мы точно знали законы природы и состояние Вселенной в начальный момент времени, то могли бы достоверно предсказать следующий момент ее существования. Но даже если бы законы природы перестали быть тайной для нас, начальное состояние мы все равно можем знать лишь приблизительно. Если бы это позволяло нам предсказывать следующие обстоятельства с такой же степенью приближения, этого было бы достаточно, и мы сказали бы, что способны предсказывать феномены, подчиняющиеся законам. Но это не всегда так; может случиться, что небольшие различия в начальных условиях станут огромными расхождениями в конечных феноменах. Маленькая ошибка в начале обернется огромной в конце. Предсказания в этом случае становятся невозможными, и мы имеем дело со случайными событиями".

Пуанкаре указывает на то, что такая крайняя чувствительность эволюции к начальному состоянию движения становится причиной очень сложного и непредсказуемого поведения, основание которого в прошлом отыскать практически невозможно. Поэтому такие феномены воспринимаются как "случайные" теми, кто наблюдает за ними. В самих движениях, о которых идет речь, никаких нарушений принципов детерминизма нет. Если точно знать начальные условия, можно идеально предсказывать поведение наблюдаемой системы в будущем. Сегодня мы знаем то, чего не знал Пуанкаре: квантовые аспекты реальности не допускают точного знания начальных условий в принципе, а не только практически. Эти ограничения имеют не только теоретическое значение. Если, играя в бильярд, вы ударите шар с такой точностью, какая только позволительна с учетом квантовой неопределенности, уже после 12 ударов о борта стола и другие шары она распространится на весь стол, и с этого момента законы движения ничего не смогут сказать вам о траектории какого-либо индивидуального шара.

Прежде чем закончить разговор о пророческих замечаниях Максвелла и Пуанкаре, было бы интересно еще раз заглянуть в трактат Бошковича и узнать, что он думал о практических аспектах разума, способного охватить движение всех частиц одновременно. Он, по-видимому, тоже осознавал неизбежность возмущений в реальных условиях, хоть и оставил без внимания их потенциально неустойчивый характер. Всех, кто надеется использовать детерминизм для достижения всей полноты знаний, он предостерегает:

> "Мы не можем надеяться на это, и не только потому, что задача слишком сложна для человеческого разума, но также потому, что мы не знаем числа этих точек, положения и движения каждой из них... Есть еще одна причина, а именно то, что свободные движения, производимые духовными сущностями, оказывают возмущающее действие на эти кривые..."

Вездесущность хаотических феноменов – еще одна проблема, подрезающая крылья нашей мечте узнать о мире все при помощи единой теории. Даже если мы сможем преодолеть трудность начальных условий и определиться с наиболее естественным или единственно возможным с точки зрения непротиворечивости исходным состоянием Вселенной, нам придется иметь дело с тем фактом, что наше описание начальных условий неизбежно будет окружено дымкой неопределенности, вследствие чего точное предсказание будущих состояний Вселенной становится невозможным. В этих обстоятельствах вероятны только статистические гипотезы.

Космологическое время

Время придумано Богом, чтобы не все произошло одновременно.

Анонимные граффити

В большинстве научных проблем вопрос начальных условий скорее технический и лишенный ореола таинственности. Мы особым образом задаем их, чтобы затем понаблюдать, к каким последствиям это приведет. Но в космологии – научной дисциплине, изучающей структуру и эволюцию

Вселенной в целом, – ситуация куда более интересная. Пока мы хотя бы в какой-то мере не разберемся с начальными условиями, наши знания о Вселенной будут оставаться весьма неполными. Мы обнаружим, что даже открытие "теории всего" не позволит нам понять, почему Вселенная зародилась так, а не иначе. Если дана последовательность чисел, и мы можем определить закономерность, существующую между ними, это позволит нам предсказывать, каким будет следующее число, и алгоритмически сжать весь ряд, но мы по- прежнему не будем знать, почему первое число именно такое, а не другое. Однако главное, что выделяет проблему космологических начальных условий, – ее метафизические последствия. Если они приводят Вселенную к эволюции, а затем – к ее нынешнему состоянию, то какой силой выбираются именно эти начальные условия, а не какие-то другие?

Они предопределяют общую структуру Вселенной. От них зависят размер Вселенной, ее форма, температура и состав. С учетом всего, что было сказано выше, проблема выглядит предельно ясной. Нынешнее наблюдаемое состояние Вселенной обусловлено ее исходным состоянием. И нам остается надеяться, что мы когда-нибудь выясним, каким оно было. Но мы увидим, что ситуация на самом деле еще интереснее. До конца XX века почти все наши представления о структуре Вселенной определялись взглядами космологов на начальные условия. А поскольку они были заданы более 10 миллиардов лет назад, когда Вселенная напоминала обширный эксперимент в лаборатории физики высоких энергий, их учет приводит космологию в противоречие с нашими представлениями о фундаментальной структуре элементарных частиц материи. Проблема, почему Вселенная такая, какая она есть, нерасторжимо связана с вопросом, почему фундаментальная физика такая, какая она есть.

Рассмотрим последствия и вариации традиционных космологических представлений, в которых проводится фундаментальное разграничение между физическими законами и начальными условиями.

Когда в 1920-е годы Хаббл открыл, что Вселенная находится в состоянии общего расширения, это было воспринято как указание, что она должна была иметь какое- то начало, в том смысле, что нынешнее расширение невозможно экстраполировать в прошлое бесконечно долго. Двигаясь в прошлое, мы вроде бы неизбежно должны дойти до момента, когда плотность вещества была бесконечной, а материя сдавлена в сгусток нулевого размера. Позже, в середине 1960-х годов, теория Большого взрыва

была подкреплена обнаружением космического поля теплового излучения, сильно остывшего вследствие расширения, которое предположительно должно было представлять собой останки изначального горячего состояния. Дальнейшее тщательное изучение моделей расширяющейся Вселенной, вытекающих из общей теории относительности Эйнштейна, подтвердило более детальные предсказания, основанные на предположениях, как должна была выглядеть Вселенная, когда ей исполнилась одна секунда от роду. Современные космологи в целом согласны в том, что нам удалось установить в общих чертах, как вела себя Вселенная на протяжении примерно 15 миллиардов лет, с момента, когда прошла секунда после "рождения", до нынешнего времени. Это не значит, что мы знаем все на свете. Мы не понимаем деталей формирования галактики, но конкретика этих процессов оказывает малое возмущение на общий ход расширения. А вот в отношении того, что происходило в течение первой секунды, наши представления куда более зыбкие. У нас нет ископаемых того времени, и мы не можем сверить с ними точность предлагаемых реконструкций далекого прошлого. Чтобы воссоздать состояние Вселенной в те первые мгновения, нам нужно знать, как ведет себя материя в условиях гораздо более высоких энергий, нежели мы можем обеспечить в экспериментальных лабораториях. Поэтому изучение истории самых ранних стадий развития Вселенной, наверное, единственный доступный нам путь проверки наших теорий, описывающих поведение материи при очень высоких температурах. Например, мы можем обнаружить, что для того, чтобы некая гипотетическая элементарная частица могла реально существовать, Большой взрыв она должна была бы пережить в таком изобилии, что сила ее гравитации на сегодня привела бы к гораздо более мощному торможению расширения Вселенной, чем мы наблюдаем.

Получается, куда ни кинь, всюду клин. Нам нужно знать поведение элементарных частиц, чтобы понять действия Вселенной на ранних стадиях, но одновременно и то, как выглядел мир в первые секунды своего существования, чтобы разобраться в поведении элементарных частиц.

Тем не менее продолжим экстраполировать нашу успешную картину Вселенной в первый секундный промежуток ее истории, используя последние данные физики элементарных частиц, которые подскажут нам, что было возможным или вероятным в том далеком туманном прошлом.

Традиционно (и до сих пор) выделяются три основных подхода к проблеме космологических начальных условий:

- показать, что они существуют;
- показать, что их влияние минимально;
- показать, что они имеют особую форму.

Первый вариант базируется на убеждении, что Вселенная не имела начала, у нее не было исходного состояния. Наиболее горячо эту позицию отстаивали Герман Бонди, Фред Хойл и Томас Голд, предложившие в 1948 году теорию устойчивой Вселенной. Их концепция давно уже вступила в противоречие с наблюдаемыми фактами, и обсуждать ее мы не будем. Куда интереснее была мотивация: ученые стремились избежать всяких особых моментов в истории Вселенной, они словно вняли предостережению Коперника не придавать какого-то сугубого значения тем или иным точкам во Вселенной. Ясно, что если она начинает расширяться (или существовать) в какой-то конечный момент прошлого или перестает расширяться (или существовать) в какой-то конечный момент будущего, то эти периоды являются особыми с точки зрения любого наблюдателя. Сторонники устойчивого развития Вселенной расширили принцип Коперника, так чтобы он относился не только к точкам пространства, но и к моментам времени, и назвали его абсолютным космологическим принципом (Герберт Дингл заметил по этому поводу, что с таким же успехом лопату можно назвать абсолютным земледельческим инструментом, а американские физики шутили, что утверждение авторов теории о неизменности Вселенной во все времена призвано обеспечить вечное господство Англии). Хотя устойчивая Вселенная расширяется, в ней постоянно сохраняется одна и та же плотность – в силу предположения, что вещество непрерывно создается, в точности компенсируя разрежение материи, вызванное расширением. Этот непрерывный процесс творения контрастирует с космологическими моделями Большого взрыва того времени, согласно которым вся материя была создана в одно мгновение. Скорость ее создания, в точности уравновешивающая эффект расширения, обеспечивалась автоматически и была настолько низкой – меньше одного атома на кубический метр за миллиард лет, – что обнаружить этот процесс было бы совершенно невозможно.

Однако, несмотря на тот факт, что как такового начала у Вселенной в этой теории нет (она всегда расширялась и будет расширяться с одной и той же скоростью), определенные параметры все равно необходимо указывать, ведь возможны вариации устойчивой Вселенной – она отнюдь не уникальная. Такими параметрами могут быть постоянная универсальная плотность материи либо, что эквивалентно, постоянная скорость ее создания

или расширения Вселенной. Чтобы в точности определить модель, мы должны задать величину некоторых параметров-условий на какой-то момент времени. "Теория всего" могла бы сообщить нам, что у Вселенной нет начала на оси времени и расширяется она аналогично устойчивой Вселенной, но многие вопросы все равно остались бы без ответа: скорость расширения, происхождение галактик, тепловое состояние Вселенной, дисбаланс между веществом и антивеществом.

Подобная логическая неполнота характерна для любой космологической модели, которая исходит из гипотезы, что Вселенная имеет бесконечное прошлое. Такая концепция неизбежно требует дополнительных спецификаций, играющих роль начальных условий, даже если начала как такового Вселенная не имеет. В бесконечно старой Вселенной истинные начальные условия соответствуют бесконечно удаленному моменту прошлого.

Интересно отметить, что философы и теологи веками пытались умозрительно решить вопрос о том, может ли Вселенная быть бесконечно старой. Кое-кто пытался доказать, что понятию бесконечно удаленного прошлого присуще какое-то логическое противоречие. А кое-кто пытается это делать по сей день. Такие идеи имеют некоторые ассоциации с космологическими аргументами существования Бога и пытаются показать, что у Вселенной обязательно должно быть не только начало во времени, но еще и творец (на практике вторую часть обычно не доказывают, а, скорее, подразумевают). Аргумент неоднозначный, даже несмотря на наше полное невежество в этих фундаментальных вопросах. Наиболее распространенная его форма сводится к тому факту, что любая наблюдаемая вещь имеет причину, а значит, и Вселенная должна иметь причину. Но в этом тезисе есть опасный поворот. Вселенная – сама по себе не вещь в указанном смысле. Это множество явлений, или, как сказал Витгенштейн, "мир – это совокупность фактов". Таким образом, наш аргумент можно уподобить следующему утверждению: поскольку у каждого члена любого клуба есть мать, значит, матери есть у всех клубов. Попробуем подойти с другого конца и скажем, что причины есть у всех событий. Однако оказывается, что в таинственном мире квантовой теории это далеко не факт. Согласно некоторым интерпретациям, мы не можем сопоставить конкретные причины индивидуальным наблюдениям, и это один из доводов, почему квантовая теория в принципе может описать творение материальной Вселенной в целом, даже не упоминая о каких-либо первопричинах.

Обсуждая характеристики устойчивой Вселенной, нуждающиеся для полноты картины в конкретизации параметров, мы упомянули скорость расширения, но не форму Вселенной. Одной из необычных черт модели устойчивой Вселенной является ее устойчивость к любым возмущениям скорости расширения в любых направлениях космического пространства. Если в какой- то части Вселенной внезапно произошло возмущающее событие или Бог вдруг решил вмешаться на мгновение и сделать так, чтобы Вселенная расширялась в каком-то одном направлении быстрее, чем в другом, эти отклонения в соответствии с абсолютным космологическим принципом с течением времени нивелируются, и мир возвращается в идеально симметричное состояние. Подобное качество является очень привлекательным в любой космологической модели, потому что, согласно наблюдениям, Вселенная действительно рашпиряется с одной и той же скоростью во всех направлениях с точностью до одной тысячной. Поиски естественного объяснения этого удивительного факта подводят нас ко второму из трех общих подходов к пониманию начальных условий Вселенной.

В космологии начальные условия являются наиболее туманным аспектом наших знаний, и это самое неприятное. Может статься, что мы никогда не узнаем, как начиналась Вселенная (если у нее вообще было начало). Поэтому всегда существовали многочисленные сторонники точки зрения, согласно которой целесообразно искать такие объяснения нынешней структуры Вселенной, которые минимально обременяют структуру непознаваемыми начальными условиями. Но как это сделать?

Существует множество физических систем, которые быстро "забывают" свои начальные условия. Под этим мы имеем в виду, что их будущие состояния практически не зависят от изменения начальных условий. Энергично перемешайте мед в большой банке – и он быстро вернется в свое прежнее неподвижное состояние. Не имеет значения, с какой скоростью, как долго и в каком направлении вы его перемешивали. Бросьте камень вниз с достаточно большой высоты. Несмотря на то, с какой начальной силой вы его бросали, скорость камня при ударе о землю будет примерно одинаковой. Это объясняется тем, что сила тяготения, создающая ускорение, и сила сопротивления воздуха, тормозящая движение, почти всегда достигают состояния, в котором полностью компенсируют друг друга, и при обнулении результирующей силы камень в дальнейшем падает практически с постоянной скоростью. Возможно, так устроена и Вселенная. Космологи на протяжении 1970-х годов искали естественные физические процессы,

которые могли бы иметь место на ранних стадиях существования Вселенной и привести ее в нынешнее состояние безотносительно к подробностям начального процесса. В частности, ученые надеялись объяснить, почему видимый мир обладает замечательным свойством расширения с равной скоростью во всех направлениях с точностью до одной десятитысячной. Вот если бы удалось показать, что какими бы ни были расхождения скоростей расширения Вселенной по разным направлениям в первые мгновения ее существования, в дальнейшем, сколько ни жди (хоть всю жизнь), мы постоянно будем видеть почти идентичную скорость расширения по всем направлениям, потому что физические процессы всегда сводятся к транспортировке энергии с места на место и выравнивают любой диспаритет.

Такой сценарий выглядит весьма привлекательным. К сожалению, все предыдущие попытки реализовать его оказались безуспешными. Главная проблема в том, что процессом сглаживания неравномерностей управляет второй закон термодинамики. Неравномерность расширения может быть уменьшена только в том случае, если это частичное уменьшение беспорядка компенсируется равным или большим увеличением энтропии в другой форме. На практике мы имеем дело с тепловым излучением. Таким образом, если вы мастерите стул из нескольких деревяшек, второй закон термодинамики не нарушается, потому что вы вкладываете в работу много физических и умственных сил, которые преобразуются в вашем теле в тепловую энергию. Однако теплового излучения в сегодняшней Вселенной мы наблюдаем совсем немного, а значит, в прошлом сглаживать неравномерности приходилось очень редко. Кроме того, даже если процессы выравнивания имеют место, существует широкий спектр космологических моделей, где от неравномерностей не удалось избавиться и по сей день. Эффекты сглаживания недостаточно сильны, чтобы преодолеть тенденцию ко все большим искажениям, заложенную в начальные условия некоторых возможных вселенных.

В результате этих негативных открытий космологи к концу 1970-х годов стали все больше разочаровываться в таком подходе к объяснению широкомасштабной однородности, наблюдаемой во Вселенной. Но потом родилась новая идея. Алан Гут предположил, что, если скорость расширения могла быстро возрастать на короткое время на ранних стадиях развития, этим можно было бы объяснить современное строение Вселенной, лишь минимально обращаясь к начальным условиям и не беспокоясь об избыточной тепловой энергии.

Такая инфляционная теория отлично все объясняла. Она базировалась на той предпосылке, что в мире элементарных частиц существуют определенные формы материи, которые ведут себя так, слово гравитация является силой отталкивания, а не притяжения. Это становится возможным благодаря тому, что они обладают отрицательным давлением, или натяжением, а в теории относительности все формы энергии (давление является одной из них) подвержены гравитации, поскольку эквивалентны массе (согласно знаменитой формуле Эйнштейна, $E = mc^2$, связывающей энергию E с массой m и скоростью света c). Если такое натяжение могло появиться в первые мгновения, то сила гравитации больше не сдерживала материю и не тормозила расширение Вселенной. Напротив, она его *ускоряла*. Период ускоренного расширения называют *инфляцией* Вселенной. Это приводит к тому, что все искажающие возмущения очень быстро гасятся, и Вселенная стремительно переходит в симметричное состояние расширения, чем объясняется остаточное состояние крайней однородности, наблюдаемое сегодня. Даже очень короткого периода инфляции было достаточно, чтобы сгладить все неравномерности, которые могли присутствовать изначально на бесконечно малом уровне. Все сровнялось начисто. Получается, что равномерное расширение Вселенной, наблюдаемое нами сегодня, находит объяснение безотносительно к начальным условиям. Но на самом деле это не совсем так. Всегда можно так хитро подобрать начальные условия, чтобы заранее указанного периода инфляционного расширения не хватило для устранения всех неровностей; но, если начальные условия выбраны в первую очередь, всегда можно подобрать такой период инфляции, чтобы его оказалось достаточно. Проблема сродни вопросу о курице и яйце. Если нам позволено выбирать период инфляции после того, как выбраны начальные условия, тогда всегда можно объяснить наблюдаемое; но если период инфляции мы выбирать не вольны, поскольку он уже зафиксирован физическими законами и константами, то всегда можно подобрать такие начальные условия, от влияния которых невозможно было бы избавиться даже к нынешнему дню. Ответ на вопрос "Что выбирать в первую очередь?" в значительной мере зависит от наших взглядов на начальные условия и их взаимоотношения с физическими законами. Если мы придерживаемся традиционного классического взгляда, что начальные условия не зависят от законов физики, тогда, в отсутствие иных возражений, мы должны считать, что их можно выбирать свободно, но при этом они имеют второстепенный статус по сравнению с физическими законами и константами. Легко представить разные начальные условия, к тому же мы привыкли задавать их по своему

усмотрению в ходе разных экспериментов; а вот изменить физический закон или величину фундаментальной константы – это гораздо более радикальный шаг. Поэтому кажется благоразумным рассматривать константы и законы, а, следовательно, и длительность периода инфляции как величины, зафиксированные до того, как мы приступаем к выбору начальных условий. При таком подходе инфляционную теорию нельзя назвать нечувствительной к начальным условиям, потому что она способна объяснить нынешнее состояние Вселенной не при любых начальных условиях. Правда, может статься, что неблагоприятные начальные условия относятся к категории немыслимых, но вопрос о разделительной грани между вероятными и невероятными начальными условиями остается открытым.

В традиционной картине расширения Вселенной, рисуемой теорией Большого взрыва, относительная пространственная однородность является чем-то вроде загадки. Чтобы разгадать ее, мы должны прежде всего разграничить понятия Вселенной в целом, которая по своей протяженности может быть бесконечной, и видимой Вселенной, представляющей собой ту ее часть, откуда свет успел добраться до нас с момента начала расширения. Видимую Вселенную можно увидеть, как сферу радиусом 15 миллиардов световых лет, в центре которой находимся мы. Пятнадцать миллиардов световых лет – это расстояние, преодолеваемое светом за то время, которое, по оценкам, прошло с тех пор, как (по-видимому) началось расширение. (Разброс оценок, опирающихся на различные астрономические наблюдения, составляет от 13 до 18 миллиардов лет, так что цифра 15 миллиардов выбрана в качестве средней.) Мы не знаем о Вселенной ничего, кроме того, что можем наблюдать в ее видимой части. Например, ничто явное не говорит нам, является ли Вселенная в целом конечной или бесконечной.

Наша видимая Вселенная действительно обладает замечательным свойством однородности. Однако если мы экстраполируем видимую область обратно по оси времени, можно понять, насколько меньше она была в первые мгновения существования Вселенной. Например, когда Вселенной была одна секунда от роду, наша видимая Вселенная имела в диаметре не более полутора световых лет. Когда возраст Вселенной составлял 10^{-35} секунды, сгусток материи, превратившийся в сегодняшнюю видимую часть Вселенной, имел в поперечнике около сантиметра. Кажется, что потрясающе мало, но для космолога, наоборот, слишком много. Это в 3×10^{25} раз больше размера участков, каузально связанных между собой в тот момент. Размер определяется легко: нужно 10^{-35} секунды умножить на скорость света (3×10^{10} сантиметров в секунду) – получается 3×10^{-25} сантиметра. Итогом такого

положения вещей становится то, что сгусток, выросший в сегодняшнюю наблюдаемую Вселенную, состоял из огромного числа совершенно независимых участков, которые, возможно, даже не "знали" о существовании друг друга в те первые мгновения (см. рисунок 3.2).

Корень этой проблемы горизонта, как ее называют, явствует из нашего описания. На первых порах Вселенная расширяется слишком медленно, так что та ее часть, которая охватывает сегодняшнюю видимую Вселенную, выросла на ранних стадиях развития из сравнительно крупного сгустка – слишком большого, чтобы можно было выровнять и сгладить все неравномерности и неоднородности в те времена, когда физические процессы были связаны по рукам и ногам ограниченностью скорости света. Однако период ускоренного расширения, характерный для ранних этапов эволюции инфляционной Вселенной, позволяет всей видимой Вселенной

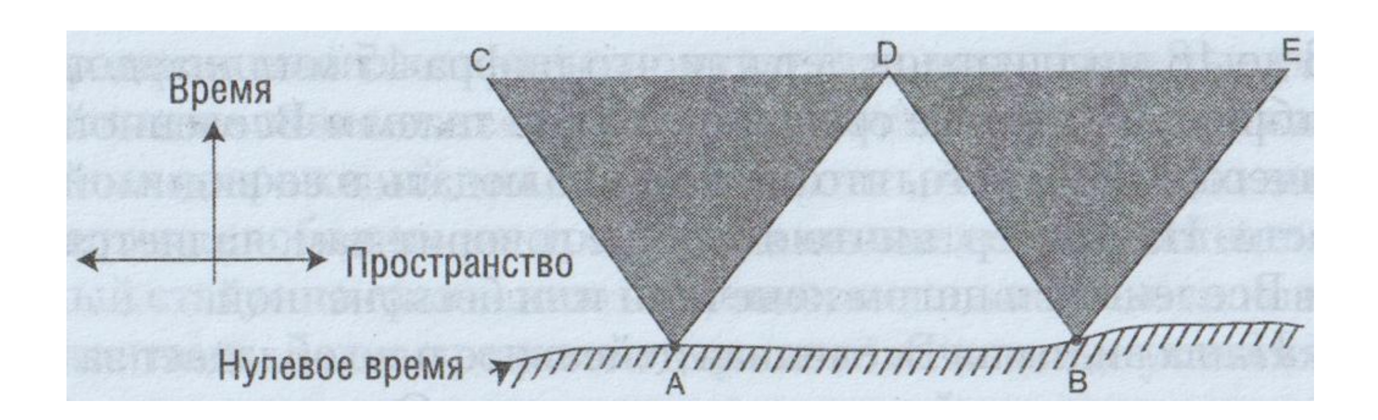


Рисунок 3.2. Сигналы, посланные из двух разных точек, A и B, когда Вселенная начинает расширяться, встретятся только в момент D. Внутренние зоны углов CAD и DBE представляют собой части пространства-времени, куда могут добраться сигналы из точек A и B соответственно. Эти коммуникационные ограничения возникают из-за того, что сигнал не может передаваться быстрее скорости света; поэтому возможности сообщения ограничены внутренними областями углов. Обратите внимание, что наблюдатель, находящийся в точке A, не способен предсказать будущее. Условия в точке D определяются сигналом, отправленным не только из точки A, но также из точки B.

развиться из сгустка, имевшего в момент времени 10^{-35} секунды гораздо меньшие размеры. Более того, моделирование показывает, что если инфляция длилась лишь короткое мгновение между 10^{-35} и 10^{-33} секунды, то вся наша видимая Вселенная могла образоваться из очень компактного сгустка, размер которого был сопоставим с возможностями передачи светового сигнала в те первые мгновения. И в этом случае преобладающая однородность видимой Вселенной находит удовлетворительное

объяснение. Это попросту многократно увеличенный образ микроскопического участка материи, который был достаточно мал, чтобы его можно было упорядочить посредством физических процессов, ограниченных в возможностях требованиями теории относительности.

В стандартной теории Большого взрыва, где инфляция не происходит, видимая Вселенная не могла возникнуть из сгустка, все части которого способны коррелировать между собой и достигать однородности. Напротив, видимая Вселенная складывается из мириадов совершенно не связанных между собой областей материи, которые должны сильно разниться, так что и видимая Вселенная должна быть крайне неоднородной.

Новые представления о первых мгновениях существования Вселенной снижают роль начальных условий, поскольку видимая Вселенная хоть и отражает отчасти структуру некоторых начальных условий, определявших состояние Вселенной до начала инфляции, эти частные начальные условия играют пренебрежимо малую роль на общей карте начальных условий (возможно, бесконечной) целой Вселенной (см. рисунок 3.3).

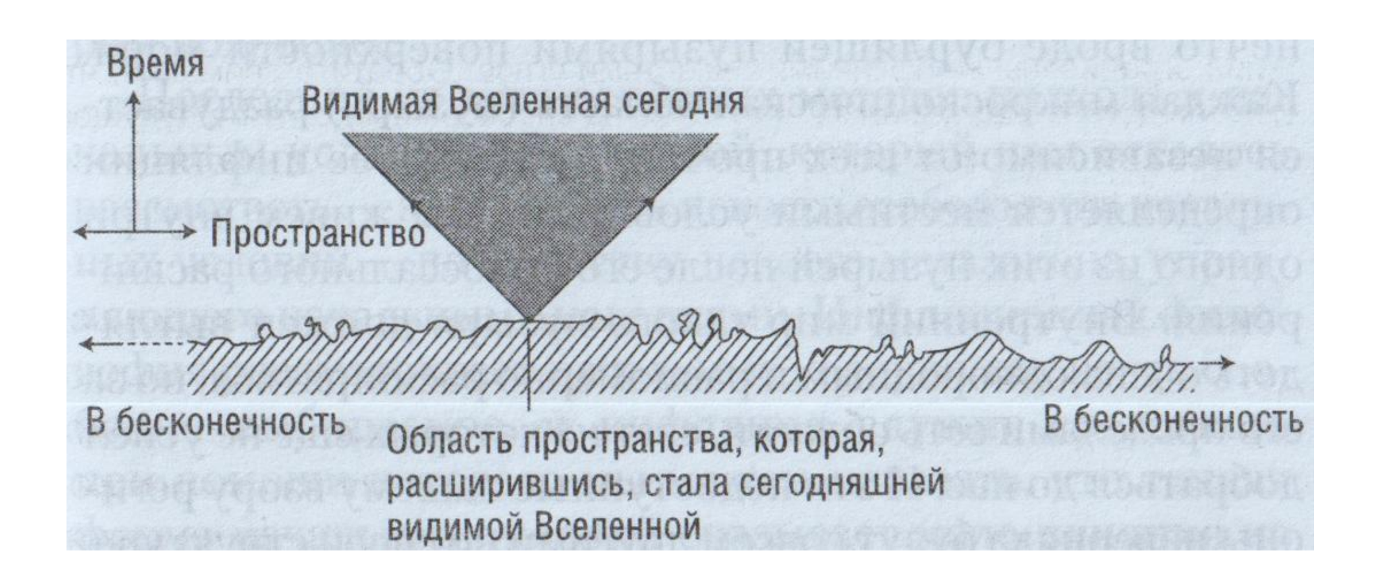


Рисунок 3.3. Структура видимой Вселенной определяется условиями, которые составляют лишь крошечную часть начальных условий Вселенной. Если она в целом имеет бесконечные размеры, то наблюдаемая нами часть Вселенной и соответствующая часть начальных условий составляют бесконечно малую часть целого.

Ученые по этому поводу не могут не волноваться. Ведь это означает, что наши наблюдения за структурой видимого мира могут, в лучшем случае, снабдить нас информацией только лишь об очень малой части начальных

условий, характеризующих первые мгновения существования расширяющейся Вселенной. Средствами наблюдений мы никогда не узнаем о структуре всех начальных условий. Они обречены навсегда оставаться (хотя бы отчасти) вотчиной философов и богословов. Это же обстоятельство исключительно затрудняет любую проверку данной теории. Даже если отдельные вариации начальных условий не допускают никакой или достаточной инфляции, во всей Вселенной обязательно найдется часть, где имеют место приемлемые начальные условия, а это все, что нам требуется. Как мы увидим в одной из следующих глав, необходимо детально исследовать, какую роль в оценке достоверности этих теорий играет наше собственное существование.

Картина начальных условий, которую рисует нам инфляционная теория, представляет собой картину хаотического и случайного начального состояния Вселенной – нечто вроде бурлящей пузырями поверхности моря. Каждая микроскопическая область (пузырь) раздувается независимо от всех прочих, и степень ее инфляции определяется местными условиями. Мы живем внутри одного из этих пузырей после его колоссального расширения. Внутренний мир такого пузыря должен выглядеть очень однородным и равномерно расширяться, но за его пределами есть области, свет из которых еще не успел добраться до нас. И эти недоступные нашему взору регионы наверняка будут совсем другими по своей структуре. У нас есть картина, которая может объяснить, почему видимая часть Вселенной такая однородная, даже несмотря на то, что от всей Вселенной мы такой однородности не ожидаем.

Инфляционный период расширения не устраняет все неравномерности посредством повышающих энтропию процессов, вроде тех, что изучались космологами 1970-х. Эти неравномерности, скорее, отодвигаются за горизонт нашей видимой Вселенной, где мы их не можем увидеть. Весь мир звезд и галактик, наблюдаемый нами, согласно этой гипотезе, является не чем иным, как отражением микроскопически малой, даже, может быть, бесконечно малой части начальных условий Вселенной, полная протяженность и структура которой обречены навечно оставаться нам неизвестными. И никакая "теория всего" здесь не поможет. Информация, заключенная в наблюдаемой части Вселенной, является следствием эволюции крошечной части начальных условий для всей Вселенной. Вся сумма наблюдений, которые мы в состоянии сделать, может что-либо сказать нам только об этой крошечной части целого.

Может статься, что жесткого разделения между законами и начальными условиями, на каковой предпосылке базировались наши рассуждения, на самом деле не существует. Вполне возможно, что для каких-то законов никакого выбора начальных условий нет, потому что они могут быть только одни. Эту вероятность мы рассмотрим подробнее.

Последний из трех основных методов подхода к начальным условиям Вселенной, который нам осталось рассмотреть, – это бытность некоего особого типа начальных условий – по существу, некоего метазакона, управляющего начальными условиями. Инфляционная философия рассматривает начальные условия как нечто свободно выбираемое, и инфляция служит средством, при помощи которого мы можем показать, что точная форма начальных условий оказывает мало влияния на то, что мы наблюдаем сегодня, пока законы физики, природа элементарных частиц и мировые константы позволяют произойти такому магическому феномену, как инфляция. А сторонники идеи специальных начальных условий пытаются найти фундаментальную связь между физическими законами и начальными условиями, которая выходит за рамки нашего обычного опыта, ограничивающегося преимущественно классической физикой. По традиции, начальные условия не сдерживаются формой законов преобразований, а если и да, то очень слабо. Если решение уравнения преобразований однозначно фиксирует начальные условия, это неизбежно означает, что речь идет о каком-то исключительно особом решении, а значит, его практическая реализация маловероятна. Таким образом, чтобы найти глубокую связь между определенной формой законов природы и дозволенными начальными условиями, нам нужно искать ситуацию, где присутствует некий вероятностный элемент в отношении возможной формы эволюционного поведения. Что-то такое всегда можно найти в любом квантовом описании порядка вещей. Как правило, попытки увязать законы с начальными условиями сосредоточены на стремительно растущем, но пребывающем все еще в эмбриональном состоянии предмете квантовой космологии. При этом исследователям неизбежно приходится распутывать попутно возникающие фундаментальные проблемы, касающиеся интерпретации квантовой теории, о которых написано множество трудов, а также куда реже обсуждаемую *проблему времени*.

Проблема времени

Англичане – не самые духовные люди. И чтобы получить какое-то представление о вечности, они придумали крикет.

Джордж Бернард Шоу

Существует философская загадка, касающаяся природы времени, упоминания о которой то и дело обнаруживаются в трудах разных мыслителей на протяжении тысячелетий. Она сводится к вопросу о том, является ли время абсолютным фоном, задником на сцене, где события разыгрываются, никак на само время не влияя, или же это вторичная концепция, целиком проистекающая из физических процессов, а значит, и подверженная их воздействию. Если принять первую точку зрения, то можно говорить о творении физической, материальной Вселенной в течение времени. Тогда имеет смысл вести разговоры о том, что было до возникновения материального мира и что будет после того, как он закончит свое существование. Здесь время представляет собой трансцендентный аспект действительности, не имеющий познаваемого начала и конца. Эта идея восходит еще к представлениям Платона о существовании неких вечных истин, из которых черпают качества все временно существующие реалии. Более того, времени присваивается многое из того, что традиционно приписывается божествам. Альтернативу представляет идея, отраженная еще в трудах Аристотеля, а особенно в сочинениях Августина и Филона Александрийского, которую затем развили и отточили ранние мусульманские натурфилософы. Суть ее в том, что время рождается вместе со Вселенной. Пока не было последней, не существовало и первое. Такой подход позволил средневековым схоластам избегать трудных вопросов о том, что было до сотворения мира и чем в это время занимался Бог. В сущности, время воспринимается как производный феномен, нерасторжимо привязанный к материальному наполнению Вселенной. Начало времени – это момент, когда возникли уже готовые к употреблению физические константы и законы. В сочинении "О граде Божием" святой Августин пишет:

> "Мир сотворен не во времени, но вместе со временем. Ибо что происходит во времени, то происходит после одного и прежде другого времени, – после того, которое прошло, и прежде того, которое должно наступить; но никакого прошедшего времени быть не могло,

потому что не было никакой твари, движение и изменение которой определяло бы время. Но несомненно, что мир сотворен вместе со временем..."

Это очень близко к нашему обычному пониманию времени. Мы измеряем его при помощи часов, которые материальны и подчиняются законам природы. В их конструкции мы используем существующую периодичность движений, будь то вращение Земли, колебания маятника или вибрации кристалла цезия, и "тиканье" этих часов идентифицируем с ходом времени. Оно не имеет для нас никакого другого смысла, кроме процесса, при помощи которого измеряется. Таким образом, мы могли бы поддержать точку зрения операционалистов, для которых время – это просто то, что измеряют часы.

Если сторонник трансцендентального взгляда мог бы сказать, что вещи движутся во времени, то сторонник операционализма скажет, что время определяется движением вещей. Одно из преимуществ первой точки зрения – мы всегда знаем, где находимся, и не сомневаемся в том, что время никогда не обманет и всегда будет таким же, как вчера и сегодня. Вторая точка зрения обещает новаторские концепции по мере того, как материальное содержание Вселенной меняется при разных условиях. Мы должны особо осознавать такую возможность, когда приближаемся к экстремальным моментам в окрестностях Большого взрыва. Дело в том, что любой момент, который выглядит как начало времен, неизбежно существует в среде, где само понятие времени является чрезвычайно эфемерным. В условиях расширяющейся и постоянно меняющейся Вселенной операциональный подход влечет за собой очень тонкое и переменчивое понимание места и смысла времени.

Абсолютное пространство и время

Время, пространство, место и движение составляют понятия общеизвестные. Однако необходимо заметить, что эти понятия обыкновенно относятся к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят некоторые неправильные суждения...

Исаак Ньютон*

Образ трансцендентного абсолютного времени, следующего тенью за ходом событий на космическом бильярдном столе бесконечного и неизменного пространства, был основой монументальной картины мира, созданной Ньютоном. Если заданы уравнения, управляющие изменениями, тогда весь будущий ход событий предопределяется начальными условиями**. Время выглядит излишним. Все, чему суждено произойти, заранее запрограммировано в исходном состоянии мира.

Ньютоновские законы движения можно применить к описанию и проследить их развитие в обратную сторону по времени. Согласно наблюдениям, наша Вселенная расширяется, а значит, следуя ньютоновской картине мира, в прошлом должен был быть момент, когда материя была сжата до нулевого размера и бесконечной плотности. Этот момент с легкой руки Фреда Хойла стали называть Большим взрывом. Однако, в силу абсолютной природы пространства и времени в ньютоновской картине мира, мы не можем прийти к каким-либо выводам насчет того, был ли Большой взрыв родоначальником времени и Вселенной. Это просто некий момент, в который, по предсказаниям известных законов, некоторые физические величины становятся бесконечно большими, фактически приобретают бесконечные значения. Но пространство и время, несмотря ни на что, продолжают существовать.

* Перевод А. Н. Крылова.

** Это не будет верно, если участвуют другие физические процессы. Например, в архетипической ситуации с бильярдными шарами, движущимися согласно законам Ньютона, их будущее поведение после столкновений с другими шарами и бортами зависит от упругости соударений, а для этого нужно знать особенности материалов, из которых сделаны шары. Такая информация выходит за рамки ньютоновской механики.

Первыми учеными, еще в XVIII веке обратившими внимание на значимость тех мест в ньютоновской теории, где какие-то объекты как будто перестают существовать или становятся бесконечными (сейчас мы называем это сингулярностями), были Леонард Эйлер и Руджер Бошкович. Они изучали, какими физическими последствиями чревато использование законов гравитации, отличных от ньютонова закона обратных квадратов. Оба обнаружили, что некоторые из альтернатив обладают тем неприятным качеством, что, если рассматривать поведение тел, вращающихся вокруг центрального солнца, решения попросту перестают существовать через какое-то конечное время в будущем. В мире, управляемом одним из таких законов, они обречены на скорое исчезновение. Бошкович считал абсурдной идею, что тело, приближаясь к центру Вселенной, должно исчезнуть, если вместо закона обратных квадратов применить, скажем, закон обратных кубов. Он обратил внимание на ранние исследования Эйлера, посвященные движению тел под действием силы тяготения, где автор утверждает, что

> "движущееся тело, приближаясь к центру силы, аннигилируется. Не разумнее ли было бы предположить, что предложенный закон сил невозможен?"

По-видимому, это были первые размышления о таких вещах в контексте ньютоновской механики.

Попытки применения ньютоновской теории гравитации и движения ко Вселенной в целом приводят к еще более глубоким проблемам. Теория гравитации не терпит идеи бесконечного пространства, наполненного материей: поскольку масса материи была бы бесконечна, это привело бы к тому, что любая точка пространства испытывала на себе огромную силу тяготения. Следовательно, ньютоновская Вселенная должна иметь конечные размеры, а значит, обладать какими-то границами в космическом пространстве. Если представить, что она простирается равномерно, значит, у нее есть четко очерченный край. Например, если вообразить Вселенную в виде шара, в центре которого находимся мы, тогда граница космоса должна представлять собой сферическую поверхность. А если Вселенная имеет форму куба, тогда граница образуется шестью его гранями. Такой взгляд не слишком привлекает, потому что нам необходимо указать, какими были физические параметры материи на границах, когда Вселенная возникла в какой-то момент в прошлом. Таким образом, ньютоновское мировоззрение

представляет материальную Вселенную в виде конечного острова посреди бескрайнего абсолютного пространства.

Хуже того, ньютоновская теория неполна. Она не вмещает в себя достаточное количество уравнений, которые описали бы все допустимые в ней события и перемены. Если бы Вселенная всегда расширялась или сжималась с абсолютно одинаковой скоростью во всех направлениях, тогда можно было бы сказать, что все предопределено. Но если допустить даже малейшие возмущения, отклонения от идеально сферического расширения в первые мгновения ее существования, то детерминизм рушится, потому что в ньютоновской физике нет такого закона, который указывал бы, как меняется форма Вселенной с течением времени. Итак, ясно, что в ньютоновской теории абсолютного пространства и времени есть недостатки. Теперь попробуем связать между собой понятия пространства, времени и материи.

Самые ранние и интересные идеи на этот счет были высказаны Уильямом Клиффордом, английским математиком, который рассматривал как раз такую ситуацию, которую Эйнштейн встроил в свою общую теорию относительности. Побудительным мотивом для Клиффорда стали математические исследования Римана, формализовавшего геометрические теории искривленных поверхностей и пространств, получившие название неевклидовой геометрии (где сумма углов треугольника, образованного линиями кратчайшего расстояния между углами на поверхности, не равна 180 градусам). Клиффорд высказал мнение, что традиционное евклидово пространство является лишь одной из многих возможностей и нельзя принимать за аксиому то, что геометрия реального мира обладает свойствами простой евклидовой геометрии. Тот факт, что локально мир кажется плоским, не убеждает, потому что большинство искривленных поверхностей представятся такими, если ограничиться рассмотрением лишь небольшого их участка. Внимательно изучив идеи Римана, в 1876 году Клиффорд изложил в статье следующий радикальный сценарий.

> "Мне хотелось бы указать, каким образом умозаключения можно применить к исследованию физических феноменов. Я утверждаю, что:
>
> 1) малые области пространства по своей природе аналогичны небольшим возвышениям на поверхности, которая в среднем является плоской, а значит, обычные законы геометрии в них неприменимы;
>
> 2) свойство кривизны постоянно передается из одной области в другую на манер волны;

3) изменение кривизны пространства на самом деле происходит в том явлении, которое мы называем движением материи, будь она весомая или эфирная;

4) в физическом мире ничего другого не происходит, кроме изменения кривизны, (возможно) подчиняющегося закону непрерывности".

Потрясающее предвидение. Хотя Эйнштейн, по-видимому, ничего не знал об этих замечаниях Клиффорда, интуитивная догадка последнего стала центральной идеей общей теории относительности. Геометрия пространства и скорость течения времени больше не являются абсолютно фиксированными и не зависящими от материального наполнения пространства-времени. Это материальное наполнение, и его движение предопределяет геометрию и ход времени. Симбиотически подобная геометрия диктует характер движения материи. Элегантная эйнштейновская теория гравитации выражается через систему уравнений, которыми диктуется связь между материальным содержанием Вселенной и ее пространственно-временной геометрией. Эти так называемые уравнения поля обобщают уравнение Пуассона, относящееся к ньютоновскому гравитационному закону обратных квадратов. Кроме того, существуют уравнения движения, задающие аналоги прямых линий в искривленной геометрии. Они обобщают ньютоновские законы движения.

В теории Эйнштейна есть еще один подкоп под тот абсолютный статус, который придавал времени Ньютон. Теория первого построена на предпосылке, что во Вселенной нет привилегированных наблюдателей, то есть нет позиций, с которых законы природы выглядят проще, чем с других. Закон должен иметь одну и ту же форму с точки зрения любого наблюдателя, как бы он ни двигался. Другими словами, как бы ни перемещалась ваша лаборатория – с ускорением или с вращением относительно соседней, – в ваших глазах и в глазах соседей физические законы должны выглядеть одинаково. Величины каких-то параметров, измеряемые вами и ими, могут быть разными, но все они должны быть связаны между собой с помощью тех же самых инвариантных соотношений.

В мире Эйнштейна нет какого-то специального класса наблюдателей, для которых, в силу особенностей их движения и учета времени, законы природы выглядят особенно простыми. А вот в мире Ньютона дело обстоит иначе. Знаменитые ньютоновские законы движения найдут подтверждение только у тех экспериментаторов, которые находятся в лабораториях,

движущихся равномерно и поступательно по отношению друг к другу и к самым удаленным звездам, которые Ньютон использовал как ориентир, находящийся в состоянии абсолютного покоя. Другие наблюдатели, пребывающие в состоянии вращения или движущиеся с ускорением, те же самые законы увидят в иной, более сложной форме. В частности, и в нарушение первого закона Ньютона, они будут наблюдать ускоренное движение тел, на которые не действуют никакие силы.

Подобная демократия наблюдателей, встроенная Эйнштейном в формулировку общей теории относительности, означает, что нет и привилегированного космического времени. Если в специальной теории относительности никакого абсолютного стандарта времени существовать не может (все его измерения осуществляются относительно состояния движения наблюдателя), то в общей теории ситуация иная. В ней много абсолютных времен. Более того, судя по всему, существует бесконечное число кандидатур на это звание. Например, кто-то мог бы использовать для координации своего учета времени локальную среднюю плотность вещества или скорость расширения Вселенной. К сожалению, пока что ни один из претендентов на звание абсолютного времени не сумел доказать, что его статус является более фундаментальным, чем у других.

Пространственно-временную Вселенную в теории Эйнштейна удобно представить, как некую "стопку" (ради наглядности вообразите, что пространства не трехмерные, а плоские, как листы бумаги). Каждый "слой" представляет собой все космическое пространство в определенный момент времени. Оно – метка, идентифицирующая каждый слой "стопки". Мы фактически можем разрезать пространство-время на ломтики разными способами, под разными углами. Вот почему в рамках теории относительности не следует разделять пространство и время, их стоит рассматривать как единое целое. Но связь между материей и геометрией пространства- времени означает, что время может определяться локально, через некое геометрическое свойство – скажем, кривизну – каждого слоя, а значит, зависеть от гравитационного поля вещества слоя, искривляющего его (см. рисунок 3.4).

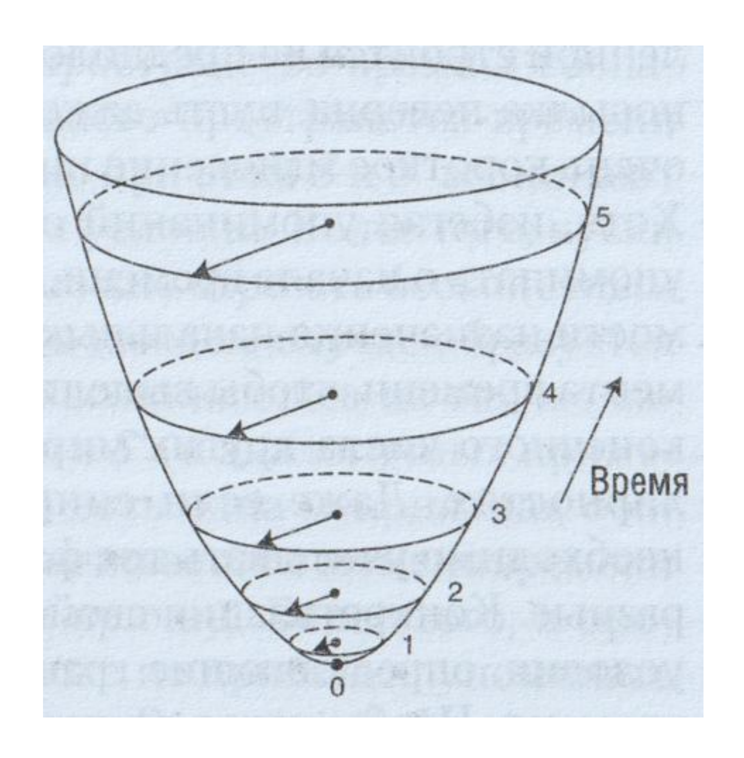


Рисунок 3.4. Каждый из разрезов пространства 1, 2, 3, 4 и 5 помечен "временем", которое калибруется радиусом окружности. Когда мы двигаемся вверх по поверхности, ход времени можно отслеживать по увеличению радиусов окружностей, ограничивающих слои.

Это новое представление о пространстве-времени (вместо пространства и времени) существенно изменило наши взгляды на начальные условия и возможное возникновение Вселенной. В силу тесной взаимосвязи между тканью пространства-времени и материей любая сингулярность в материальном содержании пространства- времени (например, бесконечная плотность вещества, возникающая в традиционной теории Большого взрыва) сигнализирует о том, что пространство-время тоже подошло к концу. И теперь мы имеем сингулярности пространства-времени, а не их в пространстве-времени. Кроме того, любое пространство-время, заданное эйнштейновской общей теорией относительности, представляет собой Вселенную целиком. Поэтому сингулярности общей теории относительности характеризуют Вселенную в целом, а не определенное место в ней или какой-то момент в ее истории. Эти сингулярности вычерчивают границу пространства-времени.

Если мы будем изучать расширяющуюся Вселенную в свете этой теории и попробуем отследить ее историю в обратном направлении, повернув время вспять, тогда может обнаружиться, что мир действительно возник из представленной сингулярности. Многие ухватились за это предсказание, увидев в нем доказательство того, что Вселенная имела

начало во времени. Однако, как и любой другой логический вывод, подобное умозаключение вытекает из предпосылок, истинность которых необходимо тщательно проверить. Наиболее шаткая из них – сила гравитации всегда притягивает. Современные теории элементарных частиц включают в себя многочисленные виды частиц и формы материи, с которыми все не так. Более того, картина инфляционного расширения Вселенной строится на предположении, что вышеназванная посылка неверна, пусть даже она нарушается только на очень короткое мгновение инфляционного расширения. Хотя, избегая упоминаний о сингулярности, можно не упоминать о начале времени, это не спасает от необходимости назначения начальных условий для какого-то момента времени, чтобы выделить нашу Вселенную из бесконечного числа других миров, рождающихся в сингулярностях. Даже если сингулярность существовала, необходимо учитывать тот факт, что ее типы могут быть разные. Конкретизация свойств – это и есть начальные условия, определяющие границу нашего пространства- времени. Чтобы такая спецификация стала возможной, необходимо еще найти кое-какие параметры.

Достаточно далеко - это сколько?

К двери одной не мог найти я ключ: вуаль мне заслонила света луч.

Омар Хайям

Общая теория относительности (и любая другая релятивистская теория, не допускающая существования абсолютно фиксированного пространства или времени) обладает еще одним тонким свойством, которого нет в ньютоновской концепции пространства и времени. Дело в том, что из одних и тех же начальных условий может возникнуть множество разных пространств-времен.

Предположим, что какое-то пространство-время S имеет набор начальных условий для некоего нулевого момента времени, который мы обозначим t_o. Мы можем построить другое пространство-время, удалив всю ту часть первого пространства-времени, которая располагается в будущем

после момента времени t_1 (который наступает позже, чем t_o), включая сам момент t_1. До наступления этого момента новое пространство-время S’ совпадает с S, но после него никакого пространства-времени пет (см. рисунок 3.5). Однако при этом S и S’ возникают из одних и тех же начальных условий. Более того, куски от пространства-времени S можно отрезать бесконечным числом разных способов, и в каждом случае образуется новое пространство-время, возникающее из тех же самых начальных условий. Но в S’ (и аналогичных примерах пространства-времени) есть одна неприятная особенность. Оно внезапно заканчивается в момент времени t_1 без видимых физических причин. Более того, в процессе доказательства нам даже не пришлось упоминать о материальном содержании Вселенной. Уравнения, управляющие поведением материи, вероятно, будут продолжать предсказывать ее существование и после наступления момента t_1, если позволить ему быть.

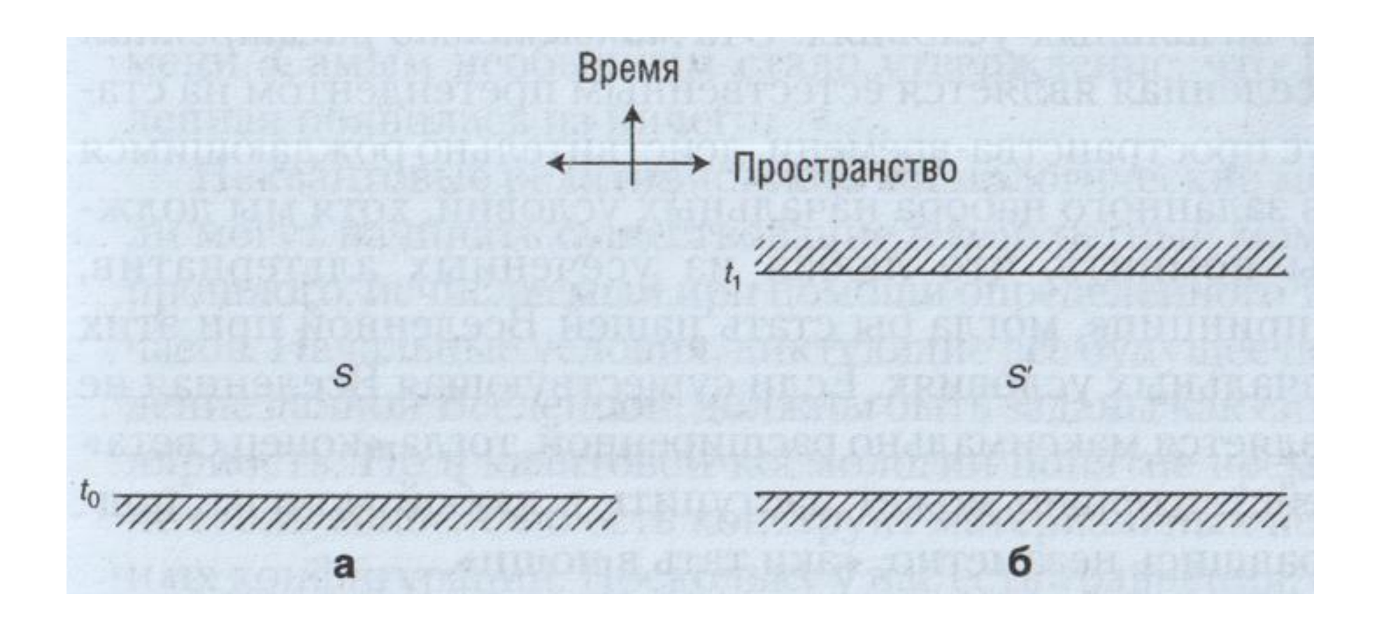


Рисунок 3.5. Два пространства-времени S и S’, определяемые идентичными начальными условиями, заданы на поверхности начального времени t_0. В случае (а) пространство-время максимально растянуто, тогда как в случае (б) оно произвольным образом усечено в некий будущий момент t_1, хотя никакая физическая бесконечность или иные дефекты пространства-времени не возникают. Таким образом, до момента t_1 пространство-время S' идентично S, но после этого момента исчезает. На практике всегда предполагается, что заданный набор начальных условий влечет за собой максимально расширенное пространство-время, а не одну из бесконечного множества искусственно придуманных альтернатив, которые идентичны до какого-то момента, а потом прекращают существование без каких-либо физических причин.

Произвольное усечение будущего космологи считают чем-то нереалистично искусственным и предпочитают исключать эту возможность, обеспечивая таким образом уникальность эволюции Вселенной при

заданных начальных условиях. Чтобы сделать это, в релятивистские теории, описывающие возможные Вселенные, помимо уточнения начальных условий и физических законов, необходимо ввести дополнительное условие: требование непрерывного существования Вселенной, пока законы, которыми руководствуются масса и энергия, не просигнализируют о том, что само время подошло к концу в реальной физической сингулярности. Если ему позволить продолжаться, то при разумных начальных условиях это влечет за собой существование уникального "наибольшего" пространства-времени, которое содержит в себе все остальные альтернативы, которые реальны при тех же начальных условиях. Эта *максимально расширенная* Вселенная является естественным претендентом на статус пространства-времени, действительно рождающимся из заданного набора начальных условий, хотя мы должны помнить, что любая из усеченных альтернатив, в принципе, могла бы стать нашей Вселенной при этих начальных условиях. Если существующая Вселенная не является максимально расширенной, тогда "конец света" действительно может наступить в любой момент, подкравшись незаметно, "аки тать в нощи".

Несмотря на тонкости, связанные с природой времени, общая теория относительности так и не смогла устранить традиционный водораздел между законами и начальными условиями. Пространство-время по-прежнему имеет какой-то изначальный слой, от которого зависит, как будет выглядеть будущее.

Квантовая тайна времени

Это была книга, чтобы убить время – для тех, кто предпочитает мертвое время живому.

Роуз Маколи

В квантовой теории время представляет еще большую тайну, чем у Ньютона и Эйнштейна. Если оно существует как трансцендентный феномен, тогда не подчиняется знаменитому принципу неопределенности Гейзенберга. Но если время определять операциональным образом, через

другие внутренние аспекты физической системы, тогда оно, косвенным образом, подвергается ограничениям, накладываемым квантовой неопределенностью. Следовательно, если попытаться дать описание всей Вселенной с точки зрения квантовой теории, можно ожидать каких-то особенных последствий для понятия времени. Самым необычным стало утверждение, что Вселенная появилась из ничего.

Неквантовые релятивистские космологические модели могут начинать существование в конкретный момент прошлого, исчисляемый при помощи определенного типа часов. Начальные условия, диктующие все будущее поведение данной Вселенной, должны быть заданы как сингулярность. Но в квантовой космологии понятие времени не столь явное. Оно есть конструкт материальных полей и их конфигураций. Поскольку у нас есть уравнения, рассказывающие, как формы меняются по мере перехода из одного слоя в другой, время становится параметром излишним. Здесь можно провести аналогию с маятниковыми часами. Их стрелки ведут учет числу колебаний маятника. В этом смысле о времени можно вообще не упоминать как о понятии. А в космологическом контексте мы помечаем слои пространства-времени соответствующей конфигурацией материи, которая создает индивидуальную геометрию каждого слоя. Эта информация доступна нам в квантовой теории только вероятностно и закодирована в так называемой волновой функции Вселенной, которую мы сокращенно обозначим буквой W.

Обобщение уравнений Эйнштейна является одной из важных проблем современной физики. Один из предложенных методов связан с использованием уравнения, впервые открытого американскими физиками Джоном Уилером и Брайсом Девиттом. Оно описывает эволюцию W. Это уравнение – адаптация знаменитого уравнения Шрёдингера, которое управляет волновой функцией обычной квантовой механики и дополнительно включает атрибуты искривленного пространства из общей теории относительности. Если бы мы знали нынешнюю форму W, то нам было бы известно, с какой вероятностью наблюдаемая Вселенная обладает некоторыми широкомасштабными характеристиками. Есть надежда, что эти вероятности окажутся тесно сконцентрированы вокруг определенных значений – подобно тому, как все крупные объекты имеют вполне определенные свойства, несмотря на неопределенности, присущие квантовой механике на микроскопическом уровне. И если эти наиболее вероятные значения окажутся близки к наблюдаемым, мы получим объяснение данных характеристик как вытекающих из того факта, что наша

Вселенная является наиболее вероятной из всех возможных. Однако, чтобы осуществить все это, нам все равно требуются начальные условия для уравнения Уилера – Девитта – исходной формы для волновой функции Вселенной.

Самым полезным параметром, используемым в манипуляциях с W, является функция T [x_1, t_1; x_2, t_2]. Она показывает вероятность прихода Вселенной в состояние x_2 в момент времени t_2, если в более ранний момент t_1 она находилась в состоянии x_1, где моменты времени могут быть переданы посредством какого-то другого параметра состояния Вселенной, например, через ее среднюю плотность (см. рисунок 3.6).

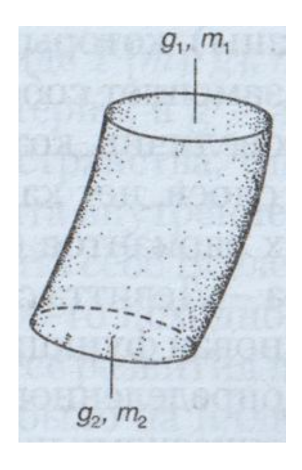


Рисунок 3.6. Некоторые пути для пространства-времени, граница которого состоит из двух трехмерных пространств с кривизной g_1 и g_2, где материальные поля находятся в конфигурациях m_1 и m_2 соответственно.

Разумеется, законы неквантовой физики предсказывают, что определенное прежнее состояние неотвратимо перейдет в конкретное будущее состояние, и ни о каких вероятностях речи нет. Но в квантовой физике последнее определяется только как должным образом взвешенная сумма всех логически возможных путей, по которым система может перемещаться через пространство и время. Одним из них может оказаться тот уникальный путь, по которому пошло бы неквантовое описание. Мы называем его классическим путем. В некоторых ситуациях, где имеет место конвенциональный детерминизм, соответствующее квантовое описание выполняет функцию перехода. Оно принципиально определяется классическим путем, а остальные варианты при этом комбинируются так, чтобы они взаимно уничтожали друг друга, как находящиеся в противофазе

волновые гребни и провалы. На самом деле это большой вопрос, при всех ли возможных начальных условиях, допустимых для квантовой Вселенной, возникает классическая Вселенная, когда мир расширяется до макроразмеров. Может статься, что имеет место какое-то очень строгое требование, необходимое также и для существования живых наблюдателей, которое выделяет нашу Вселенную как самую необычную из всех возможных вариантов. Если да, то следствие таково: по-настоящему оценить достоинства квантовой механики можно только тогда, когда изучаешь ее космологические эффекты.

На практике W зависит от конфигурации материи в определенном слое пространства-времени Вселенной и какого-то его геометрического параметра (например, кривизны), который, будучи своего рода знаком, фактически заменяет собой время. Опять же, среди геометрических величин, которые можно использовать в качестве меток слоев, нет какой-то одной наилучшей. Любого из многих вариантов будет достаточно, и тогда уравнение Уилера – Девитта сообщит о том, каким образом меняется волновая функция, переходя из одного момента внутренне определенного времени в другой. Когда мы близки к классическому пути, изменения волновой функции во внутреннем времени можно напрямую сводить к небольшим "квантовым коррекциям". Но это не всегда возможно, и, когда наиболее вероятный путь далек от классического, хоть как-то интерпретировать квантовую эволюцию, происходящую во времени, становится очень трудно. Другими словами, множество пространств-слоев, выдаваемых уравнением Уилера – Девитта, естественным образом никак не складывается в цельное пространство-время. Тем не менее функцию перехода в таких обстоятельствах все равно можно найти. Вопрос начальных условий для волновой функции ныне становится квантовым аналогом поиска начальных условий Вселенной. Явные кандидаты подставляются на место переменных x_1 и t_1 функции перехода.

Квантовые начальные условия

Нет более распространенной ошибки, чем предположение, что результат, достигнутый путем долгих и точных математических расчетов, обязательно применим к какому-то физическому факту.

А. Н. Уайтхед

Мы видели, что функция перехода T описывает переход их одной конфигурации пространственной геометрии, где материя организована определенным образом, в другую. Давайте рассмотрим ее в виде T $\{m_1, g_1; m_2, g_2\}$, где m обозначает конфигурацию материи, а g – некую геометрическую характеристику пространства, тип кривизны, рассматриваемые в два момента внутренне определяемого времени. Можно представить себе Вселенную, началом для которой служит не какое-то исходное пространство, а одна точка, так что процесс развития приобретает не цилиндрическую (как это было на иллюстрации 3.6), а коническую форму, схематически изображенную на рисунке 3.7. Однако это пока еще не позволяет нам далеко продвинуться в попытках трансформировать идею начальных условий, потому что сингулярность неквантовых космологических моделей всегда оказывается характеристикой классического пути, и в любом случае наш выбор начального условия – создание мира из одной точки – выглядит произвольным и безосновательным. Нам не удалось преодолеть дуализм между законами (представленными здесь в форме уравнения Уилера – Девитта) и начальными условиями.

Есть радикальный путь, по которому мы сейчас попробуем проследовать. Необходимо подчеркнуть, что он может оказаться бессмысленным с точки зрения физического значения. Это вопрос веры. Если мы посмотрим на рисунки 3.6 и 3.7, то увидим, что ограниченность начального условия g_1 связана с состоянием пространства в позиции g_2- Нельзя ли их границы скомбинировать так, чтобы они описывали единое гладкое пространство, не содержащее этих ужасных сингулярностей?



Рисунок 3.7. Путь пространства-времени, граница которого состоит из искривленного трехмерного пространства с кривизной g_2 и одной начальной точки вместо другого трехмерного пространства. Если имеет место сингулярность кривизны и конфигурации материи в этой точке, мы не можем рассчитать вероятность перехода T из этой точки в состояние с кривизной g_2. Если бы это было возможно, мы знали бы вероятность возникновения определенного типа Вселенной из точки, а не из ничего.

Нам знакомы возможности такого рода в двух измерениях, например, сферическая поверхность, вся гладкая и не имеющая сингулярных точек. Поэтому позволительно предположить, что граница четырехмерного пространства-времени состоит не их двух частей g_1 и g_2, а представляет собой единую ровную трехмерную поверхность. Это мог быть аналог шара в четырехмерном пространстве. Одна из любопытных и привлекательных черт гладкой поверхности, которую будет удобнее рассмотреть на примере обычной, двумерной сферы, состоит в том, что она имеет конечный размер, но не имеет края: площадь сферы конечна (чтобы ее покрасить, потребуется определенное количество краски), но, если двигаться по ней, никогда не наткнешься на вершину конуса. С точки зрения существ, живущих на такой поверхности, у нее нет края, нет границы. Интересно, что подобную конфигурацию можно замыслить как начальное состояние Вселенной (см. рисунок 3.8). Однако – и вот сейчас обещанный радикальный шаг – шар, который мы используем как модель мира, представляет собой трехмерное пространство с двумерной границей-сферой. А чтобы обозначить квантовые границы, нам потребуется трехмерное пространство. Однако эта конфигурация возможна только в четырехмерном *пространстве*, а не в четырехмерном *пространстве-времени*, каковым мы всегда считали реальную Вселенную. Поэтому в квантовом космологическом контексте предлагается отказаться от обычного толкования времени и рассматривать его как дополнительное измерение пространства, в результате чего

трехмерное пространство плюс одномерное время превращаются в четырехмерное пространство. Здесь нет мистики, как могло бы показаться, и физики часто применяют этот "фокус" с превращением времени в пространство как полезное средство решения некоторых проблем в рамках обычной квантовой механики, хоть делают это чисто формально, и мысли не допуская, что время *действительно* становится пространством. По окончании расчетов они просто возвращаются к обычному толкованию, отделяя время от других трех измерений, которые мы называем пространством.

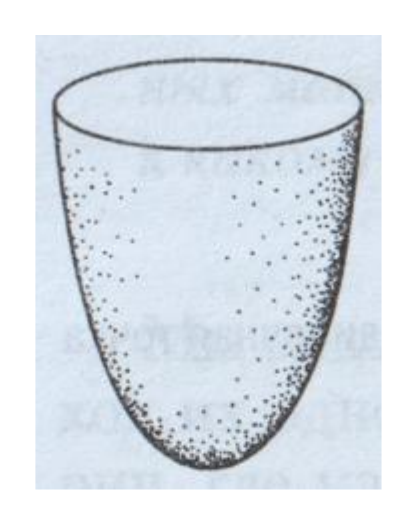


Рисунок 3.8. Привлекательно выглядит путь, граница которого гладко скруглена и не содержит вершину конуса, как на рисунке 3.7, а состоит только из одного трехмерного пространства. Ситуацию можно интерпретировать как возникновение Вселенной из ничего, потому что никакого начального состояния нет: граница только одна. Этот вариант подходит как иллюстрация картины трехмерной границы четырехмерного пространства-времени, только если мы представим, что время ведет себя как одно из измерений пространства.

Радикальность данного подхода состоит в том, что время действительно рассматривается как пространство в квантовом гравитационном окружении Большого взрыва. По мере того как мы уходим все дальше от начала Вселенной, квантовые эффекты начинают интерферировать, гася друг друга, и последняя постепенно выходит на классический путь. Тогда начинает выкристаллизовываться традиционное понятие времени как концепции, отличной от пространства. И наоборот, чем ближе мы подходим к началу, чем сильнее сказываются эффекты начальных условий, тем сильнее традиционные понятия пространства и времени сплавляются в одно целое, пока не становятся неразличимыми.

Такое "безграничное" начальное условие из эстетических соображений предложили Джеймс Хартл и Стивен Хокинг. Подобная ситуация позволяет избежать сингулярностей в исходном состоянии и устраняет традиционный дуализм между законами и начальными условиями. Стираются различия между пространством и временем. Точнее сказать, идея отсутствия границы требует, чтобы мы рассчитывали волновую функцию Вселенной как взвешенную совокупность путей, ограниченных теми четырехмерными пространствами, которые обладают одной финитной гладкостью типа обсуждавшейся выше сферы. При данных условиях вероятность перехода к продукту волновой функции с каким-то другим материальным наполнением m_2 в геометрической конфигурации g_2 имеет вид T [m_2, g_2]. Начальное состояние, характеризуемое параметрами m_1 и g_1, здесь даже некуда подставить. Поэтому такой подход часто интерпретируется как картина создания из ничего, где T равно вероятности возникновения определенного типа Вселенной из ничего. Эффект предложения "время становится пространством" состоит в том, что нет ни определенного момента, ни определенной точки, откуда пошло творение. Выражаясь терминами стандартной квантовой механики, можно сказать, что Вселенная является результатом туннельного процесса, который приходится интерпретировать как движение из ничего. Эти явления, хорошо знакомые физикам и регулярно наблюдаемые, соответствуют переходам, где нет классического пути.

Великий рубеж

Иногда я спрашиваю себя, почему именно мне удалось разработать теорию относительности. Причина, думаю, в том, что нормальный взрослый человек вообще никогда не задумывается над проблемой пространства и времени. Об этом думают в детстве. Я же развивался интеллектуально так медленно, что пространство и время занимали мои мысли, когда я стал взрослым.

Альберт Эйнштейн

Смысл картины заключается в том, что уравнение Уилера – Девитта задает физический закон, описывающий изменения функции W. Геометрия пространства может использоваться как мера времени, которое в отдалении от Большого взрыва выглядит очень похоже на обычное время общей теории относительности. Но если оглянуться назад, мысленно приближаясь к тому мгновению, которое мы называем нулевым временем, само понятие о нем гаснет и в конце концов исчезает. Такого типа квантовая Вселенная существовала не всегда; она возникла, но не вследствие Большого взрыва, на котором строятся классические космологические модели, где в нулевой момент времени физические величины достигают бесконечных значений и необходимо уточнять дополнительные начальные условия. Какую бы модель мы ни приняли, никакой информации о том, из чего могла возникнуть Вселенная, у нас нет.

Следует еще раз подчеркнуть, что вышеизложенное предложение является радикальным (и может оказаться еще даже более крайним, как мы увидим в главе 5). Оно состоит из двух компонентов: предложения "время становится пространством" и тезиса об отсутствии границы. Сообща обе идеи описывают состояние Вселенной, которое само исполняет как роль законов, так и начальных условий в традиционной картине мира. Если принять только первую идею, вместо второй можно использовать множество вариантов дополнительного требования, уточняющего состояние Вселенной, совершающей туннельный переход из ничего. Все эти положения нуждаются в конкретизирующей информации.

Изучение волновой функции Вселенной находится в начальной стадии. Вне всяких сомнений, в предложенной теории многое еще изменится, пока она будет доведена до ума. Условие "отсутствие границы" оставляет желать лучшего. Оно, вероятно, содержит слишком мало информации, чтобы описать все наблюдаемые характеристики реальной Вселенной, содержащей такие неоднородности, как галактики. Требуются данные и насчет материальных полей во Вселенной и их распределения. Не исключено, что эта теория в конце концов окажется полным вздором. Важный урок, который мы должны извлечь, состоит в том, что наш традиционный дуализм в отношении физических законов и начальных условий может быть хотя бы отчасти ошибочным. Если существование единой теории мироздания действительно вероятно, мы можем ожидать, что она воспользуется возможностью измерять время через материальное содержание, чтобы соединить в одно целое все составляющие природы с законами, которые управляют их изменениями и самим временем. При этом сохраняется

необходимость выбирать граничное условие, накладываемое на волновую функцию Вселенной или какой-то ее аналог. Невозможно отвернуться от того факта, что, при всей их экономичности, "безграничное" условие и его различные соперничающие альтернативы выбраны только из эстетических соображений, а не по требованию внутренней логики квантовой Вселенной.

Дуалистическая точка зрения, что начальные условия не зависят от законов природы, должна быть пересмотрена. Если Вселенная уникальна – представляет собой единственную логически непротиворечивую возможность, – значит, и начальные условия исключительны и по существу сами становятся законом природы. Эта информация является хорошей мотивацией для тех, кто ищет базовые принципы, которые помогли бы очертить начальные условия Вселенной, поскольку вводится новый ингредиент в наши представления, потому что он указывает на фундаментальную асимметрию между прошлым и будущим в физических законах. С другой стороны, если мы верим в возможность существования многих вселенных – более того, что они где-то существуют, – тогда начальные условия утрачивают особый статус. Они становятся обыденным вопросом, как в большинстве физических задач, где определение начальных условий просто позволяет выделить одно из множества похожих решений.

Традиционная точка зрения, что начальными условиями должны заниматься теологи, а уравнениями эволюции – физики, опровергнута (по крайней мере, временно). Космологи ныне активно заняты изучением первых, стремясь понять, существует ли закон начальных условий, для которого "безграничное" предложение было бы лишь одним из частных примеров. Этот достаточно радикальный на первый взгляд подход может оказаться, однако, не совсем таким. Беспокоит, что очень многие концепции и идеи, используемые в современном математическом описании мира, – возникновение из ничего, рождение времени вместе со Вселенной – на самом деле представляют собой не более чем рафинированные вариации достаточно традиционных интуитивных взглядов и категорий мышления. Ясно, что именно традиционные представления послужили побудительным мотивом для поиска и даже проникли в современные теории, приняв математическую форму. "Время становится пространством" – единственный воистину радикальный элемент, который никак нельзя соотнести с наследием, оставшимся от прежних поколений философов и богословов. И есть основания подозревать, что очень многие привычные концепции придется трансформировать, прежде чем начнет проявляться истинная картина мироздания.

Глава 4

СИЛЫ И ЧАСТИЦЫ

Вакуум гораздо лучше некоторых веществ, которыми природа его заполняет.

Теннесси Уильямс

Вещество вселенной

Декорации в пьесе были великолепные, но актеры то и дело их загораживали.

Александр Вуллкот

Любой машине, будь то компьютер или фрезерный станок, чтобы она нормально работала, требуется подходящее "сырье". Вы сконструировали гаечный ключ, соблюдая все общие принципы механики и симметрии, но он будет совершенно бесполезен, если его форма не позволит откручивать шестигранные гайки. Точно так же и "теория всего" в качестве "сырья" нуждается в информации о силах и частицах, реально существующих в природе. Знание законов практически бесполезно, если мы не понимаем, чем конкретно они управляют. В этом смысле отметим резкий контраст между классической физикой Ньютона и миром элементарных частиц. Ученый подчеркивал универсальность его законов движения: они применимы ко всем без исключения "телам", независимо от их каких-то особых свойств. Однако именно эта общность не позволяет четко ответить на вопрос, какие из тех и других реально существуют. Внимание сосредоточено на некоторых универсальных атрибутах, таких как масса, а все прочие свойства не учитываются. Тем, кто со школы привык руководствоваться

принципами ньютоновской механики, подобный подход кажется знакомым и разумным, но насколько трудно было исследователям прошлых веков, изучавшим законы движения, выделить важнейшие свойства реальных объектов для включения в формулу движения. Эту проблему красиво описывает французский ученый X VIII века Моро де Мопертюи, основоположник принципа наименьшего действия. В отношении законов сохранения импульса, которым подчиняются ударяющиеся бильярдные шары, он замечает:

> "Если бы некто, никогда не притрагивавшийся к телам или не видевший, как они соударяются, но разбирающийся в цветах, увидел синий объект, движущийся в направлении желтого, то на вопрос, что будет, если эти два объекта столкнутся, он, вероятно, ответил бы, что при контакте с желтым телом синее станет зеленым".

Нетрудно понять, почему количество свойств тела, значительно влияющих на его динамику, должно быть минимальным. Типичные объекты "нормальных" размеров, такие как камень, мяч или автомобиль, имеют так много всяких индивидуальных свойств, что если бы законы движения учитывали все эти особенности, то лучше бы они отсутствовали. Каждый камень, мяч, автомобиль отличаются от всех остальных по очень многим параметрам, поэтому один и тот же закон по-разному описывал бы движение каждого из них. Схожий взгляд на проблему мы обнаруживаем во многих древнегреческих письменных источниках. Идея внешнего, трансцендентного Законодателя, диктующего законы природы, шла к древним грекам с большим трудом. Они упорно держались представления, что каждый объект обладает имманентными качествами, от которых и зависит то, как он движется. Если Платон пытался понять мир посредством абсолютных идей, по отношению к которым наблюдаемые объекты являются лишь несовершенным, приблизительным подобием, то Аристотель считал, что формы, диктующие поведение реальных вещей, существуют не в какой-то абстракции, а в самих вещах. Идеи последнего продержались тысячи лет, пока не были отодвинуты в сторону комбинацией религиозных и научных представлений. Ньютон в довольно резкой форме отверг эту классическую традицию внутренних сущностей в своем письме к Ричарду Бентли:

> "То, что гравитация должна быть врожденным, неотъемлемым и необходимым свойством материи... на мой взгляд, является таким абсурдом, с которым не согласится ни один человек, обладающий способностью к философскому мышлению".

Ученый считал необходимым отказаться от таких воззрений, чтобы иметь шанс продвинуться вперед и отделить явное от неизвестного. Универсальные законы никогда не были бы открыты, если бы мы продолжали считать их внутренним свойством тех самых частиц, которыми они призваны управлять. После Ньютона и до начала XX века физики приучились логически различать материальное содержание Вселенной и законы, этой основой управляющие. Материальную составляющую мы открываем путем непосредственных наблюдений, а вот законы, регулирующие поведение объектов путем воздействия на небольшое число важнейших атрибутов, таких как электрический заряд и масса, выявляются за счет накопленного опыта и знаний.

Принцип тождественности

Повторение – единственная форма постоянства, достижимая в природе.

Джордж Сантаяна

Нормы, регулирующие поведение элементарных частиц, отличаются от классических законов движения именно тем, что объекты, которыми управляют первые, не являются разными. Если камни и бильярдные шары, рассматриваемые в классической физике, отличаются друг от друга, то элементарные частицы распадаются на классы тождественных частиц: все электроны, мюоны и т. д. абсолютно одинаковы. Это мир клонов. Видеть электрон – значит видеть все электроны. Но именно в силу принципа тождественности законы, управляющие поведением электронов и мюонов, оказываются тесно связаны с внутренними их особенностями, при этом общность последних сохраняется. Данное положение также играет очень важную роль в стремлении людей познать Вселенную, потому что на нем держится наша вера в то, что, основательно изучив ее маленькую часть, мы сможем приблизиться к пониманию мироустройства в целом.

Тот факт, что Вселенная населена огромными популяциями совершенно идентичных элементарных частиц, является ее самым

замечательным свойством. Это свидетельство невероятно "тонкой настройки". Наш опыт изучения мира никогда не давал повода усомниться в предположении, что все электроны тождественны, как и фотоны, где бы и когда бы они ни существовали. В XIX веке Джеймс Клерк Максвелл установил, что физический мир состоит из идентичных атомов, которые не подвергаются постепенной мутации или эволюции. Сегодня мы ищем более глубокое объяснение природы элементарных частиц посредством "теории всего", в частности с позиции теории струн. Одной из обескураживающих особенностей концепций, успешно объясняющих электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия между частицами, подтолкнувших физиков к поиску более глубокого объяснения сути вещей, стало чрезмерное изобилие типов элементарных частиц. Их так много, что сам собой напрашивается вывод: за этими частицами кроются какие-то еще более фундаментальные и гораздо менее многообразные единицы. Может, элементарные частицы вовсе не являются элементарными и представляют собой различные комбинации гораздо меньшего числа действительно элементарных объектов? До сих пор попытки теоретического обоснования таких "кирпичиков", из которых строятся элементарные частицы, не привели к ощутимым результатам. Посылов, которые можно было бы проверить, пока нет.

Теории струн предлагают другой путь к решению проблемы. Вместо точечных элементарных частиц они вводят в рассмотрение такие базовые единицы, как натянутые линии или петли энергии. Когда температура высокая, последние дрожат и вибрируют, подобно струнам, но по мере снижения температуры сила натяжения возрастает, и эти петли становятся все больше похожими на точки. Таким образом, в условиях низких энергий струны ведут себя как точки, что позволяет в теории так же аккуратно описывать наблюдаемое, как это делают более традиционные концепции, где частицы уподобляются точкам. Однако при высоких энергиях все меняется. Есть надежда, что удастся определить главные энергии вибрации. Все струны, даже гитарные, "пробуждаются", если к ним прикоснуться. Рассчитав особую энергию суперструн, памятуя о силе знаменитой формулы Эйнштейна об эквивалентности энергии и массы ($E = mc_2$), можно было бы определить массу, в каком-то смысле соответствующую "частицам", которые мы называем элементарными. До сих пор сделать это никому не удалось. Однако одна из форм этой энергии все же обнаружена. Она соответствует частице с нулевой массой и двойным спином (то есть собственным моментом вращения величиной в две кантовые единицы). Благодаря

вращению частица, называемая гравитоном, как посредник, обеспечивает притяжение между любыми массами. Мы видим, что теория струн обязательно включает в себя феномен гравитации, и это весьма замечательно, поскольку прежним кандидатам на "теорию всего" не удалось включить это явление в процесс унификации.

Тождественная повторяемость – отличительная черта самых фундаментальных составляющих. Именно этим объясняется, каким образом в физическом мире достигается точность и надежность таких феноменов, как репликация ДНК или устойчивость свойств материи. Но мы увидим, что при этом открывается возможность стирания резкой грани между физическими законами и теми фундаментальными явлениями, которыми непреложная заданность призвана управлять (как в предыдущей главе мы уже наблюдали ситуацию с физическими законами и начальными условиями в квантовой картине Вселенной). Если четкое разделение между компонентами, составляющими Вселенную, и управляющими ими законами действительно существует, тогда любая "теория всего" потребует дополнительной информации, которая ограничила бы возможности отождествления частиц. Такое требование не может удовлетворить любителей строить модели вселенных. Мы рассчитываем на то, что в каком-то смысле все сущее можно свести воедино, когда законы и управляемые фундаментальные физические частицы сольются в идеальной и уникальной взаимосовместимости. Законы должны объяснять не только то, что подчиняющиеся им объекты имеют право делать, но и что они из себя представляют.

Этот симбиоз стал центром внимания современных физиков после появления так называемых калибровочных теорий. Они объясняют природу фундаментальных сил – гравитации, электромагнетизма, а также сильного и слабого ядерных взаимодействий. Далее мы рассмотрим, как образуется этот тройственный союз частиц, сил и законов.

Для физика ньютоновской школы, согласно которой законы природы управляют движением объектов в абсолютном пространстве и линейном времени, подоплека воздействия сил на объекты остается тайной. Сила тяготения мгновенно возникает между массами. Попытки Ньютона углубиться в понимание этого процесса остались бесплодными. На протяжении XX века физики осознавали значение эффекта ограничения скорости передачи информации в космическом пространстве, установленного специальной теорией относительности Эйнштейна. Мгновенное гравитационное взаимодействие нарушало бы запрет на

скорость передачи сигналов, превышающую скорость света в вакууме. В результате мы пришли к представлению, что физические силы действуют посредством обмена частиц между взаимодействующими телами. Так, гравитационное взаимодействие осуществляется за счет обмена гравитонами, электромагнитное – при помощи фотонов, слабое – через массивные W- или Z-бозоны, а сильное между кварками – путем обмена глюонами. В некоторых случаях эти обменные частицы фактически чувствуют силу первоисточника. Это верно в отношении гравитационного, сильного и слабого взаимодействий. Однако с электромагнитным взаимодействием, возникающим между электрически заряженными элементарными частицами, ситуация иная. Взаимодействие между ними осуществляется посредством обмена фотоном света, который заряда не имеет. Таким образом, мы видим, что физические взаимодействия и их связь с элементарными частицами нельзя рассматривать отдельно.

Другие стороны нашего золотого треугольника (взаимосвязи между силами и частицами, с одной стороны, и самими законами – с другой) существуют только в элегантных творениях человеческого разума, названных калибровочными теориями. Их появление стало ощутимым ударом по укрепившейся после научных революций Галилея и Ньютона точке зрения, что ученый не должен спрашивать, зачем и почему. Природа так устроена. Должно спрашивать лишь как. Сегодня исповедуется другой подход. Калибровочные теории показывают, что физики обязаны довольствоваться теориями, идеально точно описывающими, как частицы двигаются и взаимодействуют. Они могут также кое-что узнать и о том, зачем эти частицы существуют и почему взаимодействуют так, как мы это видим.

Самые успешные фундаментальные теории физики – общая теория относительности (теория гравитации), квантовая хромодинамика (теория сильного субъядерного взаимодействия между кварками и глюонами) и теория Вайнберга – Салама (единая теория электромагнитного и слабого взаимодействий) – относятся к особой категории *локальных калибровочных теорий*. Мы уже видели в главе 2, что некоторые геометрические инвариантности законов природы эквивалентны определенным физическим инвариантам. Иными словами, каждой форме симметрии соответствует та или иная сохраняемая величина. Это соответствие соблюдается даже тогда, когда речь идет о куда менее явных формах симметрии, нежели простые вращения или пространственные трансляции. Подобные дополнительные инвариантности называются внутренними симметриями и соответствуют физическим инвариантностям относительно переименования частиц –

скажем, если все нейтроны во Вселенной поменяются местами с протонами. Калибровочные же симметрии отличаются от всех прочих. Они не приводят к сохранению каких-то физических величин. Вместо этого накладывают серьезные ограничения на форму и радиус действия физических законов. В частности, диктуют, какие силы существуют в природе и на какие именно свойства элементарных частиц они воздействуют. Простейшим примером этого служит *глобальная калибровочная симметрия*. Она требует, чтобы мир остался прежним, если мы одинаковым образом сдвинем все точки пространства. Представьте, что осуществляете такую операцию с каким-нибудь предметом, например, со своей рукой. Она переместится в пространстве, но внешне не изменится. Однако было бы неестественно предполагать, что все преобразования окажутся всюду одинаковыми. Если в данный момент изменилась какая-то частица на другом конце Вселенной, то частица, находящаяся здесь и сейчас, узнает об этом не раньше, чем световой сигнал пройдет путь между ними. А одновременное их изменение потребовало бы мгновенной передачи сигналов. Глобальная калибровочная инвариантность представляет собой довольно непривлекательное ограничение, сохраняющее в себе отзвуки ньютоновских представлений о мгновенном действии на расстоянии. Это подводит нас к выдвижению более реалистичного, но одновременно гораздо более сурового требования – локальной калибровочной симметрии, где каждая точка может меняться по-разному.

Кажется, что инвариантность в этом случае невозможна. Представьте, что каждый участок вашей руки перемещается в разные стороны. Обеспечить инвариантность при таком многообразии доступных преобразований можно только одним путем: если существуют силы, сдерживающие допустимые движения. Представьте, что ваша рука обвязана эластичными бинтами, сдерживающими движения отдельных ее частей. В мире элементарных частиц есть нечто подобное: бесконечная сеть переплетенных между собой ограничений, которые резко сужают возможности преобразований. Таким образом, требование локальной калибровочной симметрии фактически диктует, какие силы между частицами могут существовать. И это позволяет объяснить не только принцип действия электромагнитного взаимодействия, но и причину его существования.

Общая теория относительности Эйнштейна является локальной калибровочной теорией такого представления. Ученый хотел распространить принцип относительности, когда законы физики будут оставаться одними и теми же для всех наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью по

отношению друг к другу, на ситуацию, в которой они движутся с ускорением. Для ситуации с произвольными ускорениями соблюдение этого принципа относительности оказалось возможным при существовании сдерживающего действия гравитационного поля.

Платоновская вера в симметрию и использование ее как основы калибровочных теорий служат фундаментом для наших знаний о взаимодействиях элементарных частиц. Но этого недостаточно. Например, мы не можем узнать из этих посылов, сколько частиц сходного типа должно быть. Почему есть три типа нейтрино, а фотоны, наоборот, существуют только одного вида. Судя по всему, принцип тождественности используется природой двояко. Она создала популяции идентичных частиц, таких как электроны и электронные нейтрино, но при этом также мюоны и мюонные нейтрино, тау-частицы и соответствующие им тау-нейтрино. Электрон и электронное нейтрино во многих отношениях сходны. Но хотелось бы знать, зачем нужны эти мелкие вариации на одну и ту же тему и почему их столько, а не больше. Калибровочных теорий много, но ни одна так и не смогла объяснить, сколько должно быть копий. Для получения полной картины Вселенной калибровочные теории должны быть сведены в одно целое за счет объединения различных форм симметрии в одну большую схему – "теорию великого объединения". Это устраняет проблемы разрозненности, но все еще не дает ответа на вопрос, чем ограничивается число типов сходных частиц.

Симметрии калибровочных теорий строятся за счет конечного числа вариаций, применяемых к одной и той же базовой теме. Существует лишь определенное число базовых генераторов (образующих) возможных конфигураций, охватывающих все возможности, совместимые с данным типом симметрии. Чем больше генераторов, тем шире диапазон конфигураций. Кроме того, базовые генераторы множества конфигураций, совместимых с подразумеваемой симметрией, задают ее и выступают частицами-"переносчиками" различных фундаментальных взаимодействий. Так, в максвелловской теории электромагнетизма есть только один генератор симметрии, и он соответствует фотону; симметрия, присущая слабому взаимодействию, имеет три генератора, которые соответствуют электрически нейтральному Z-бозону, а также положительно и отрицательно заряженным W-бозонам; сильное взаимодействие между кварками имеет 8 генераторов, соответствующих восьми разновидностям глюонов, и они могут быть грех разных "цветов". В итоге мы видим, что во всех этих теориях присутствует финитность. Она ассоциируется с конечным числом

элементарных частиц, которые являются базовыми генераторами симметрии. Мир с бесконечным числом типов элементарных частиц был бы миром полной анархии. Симметрии были бы такими крупномасштабными, что их влияние сошло бы на нет.

Элементарность

Мы говорили о "свойствах вещей" и о том, в какой степени они поддаются исследованию. В качестве крайности был предложен вопрос: "Исследование всех свойств песчинки позволит ли нам познать Вселенную в целом так, чтобы не осталось никаких неразрешенных вопросов?"

А. Мошковски

Наиболее животрепещущий вопрос, связанный с идентификацией физических сил и частиц, – это необходимость разобраться с самыми элементарными сущностями. До недавнего времени они неизменно представлялись идеализированными точками нулевого размера. Кварки и лептоны считались частицами именно такого рода, поскольку их внутренняя структура никоим образом не проявляла себя в ходе экспериментов. Если бы ученого, специализирующегося на элементарных частицах, спросили, сколько ангелов могут танцевать на кварке, он без малейших колебаний ответил бы: "Ни одного". Однако теории, в которых самые фундаментальные сущности выступают в виде точек, – квантовые теории полей – обладают "неприятными" свойствами. Они приводят к математическим бесконечностям, а их приходится отбрасывать в процессе расчета наблюдаемых величин. Обычно используется универсальный метод, который фактически сводится к тому, что бесконечно большая часть ответа отбрасывается, однако с эстетической точки зрения подобная процедура не выдерживает никакой критики. Эту методику, впрочем, терпят, потому что остающиеся после вычитания бесконечности конечные части ответов обеспечивают фантастическую точность прогнозов наблюдаемых величин. Ясно, что где-то там неподалеку скрывается глубинная истина, объясняющая столь странную ситуацию.

В настоящее время общепризнано, что теории, в которых наиболее элементарные сущности выступают в виде линий или петель (струн), а не точек, позволяют избежать этих пороков. Кроме того, если в моделях с частицами-точками для каждой элементарной частицы необходимо отдельно уточнять точки, наделенные такими качествами, как масса, то каждая струна обладает бесконечным числом мод колебаний, сходных с вибрацией скрипичной струны, и энергия каждой моды соответствует некоторой массе элементарных частиц (через эквивалентность массы и энергии согласно формуле $E = mc_2$). Большая часть совокупной массы будет сосредоточена вокруг ненаблюдаемых высоких энергий, но оставшаяся часть должна содержать и массу известных нам элементарных частиц. Кроме того, число вариаций каждого типа частиц, по-видимому, связано с фундаментальной симметричной структурой этих теорий. Они в состоянии объяснить нам, почему в условиях низких энергий существуют три разновидности нейтрино. Если ранние теории не давали ответов на подобные вопросы, то концепции струн глубже проникают в законы природы, в результате чего возникает возможность ответить на вопрос "почему", а не только "как". Именно поэтому на теории струн возлагаются большие надежды, и их небезосновательно считают главными претендентами на статус "теории всего". Они должны содержать в себе глубокую связь между симметриями, или законами природы, и теми элементарными сущностями, которыми эти законы управляют. Однако до сих пор не получается извлечь данную информацию из теории: задача оказалась слишком трудной. Иметь "теорию всего" – одно дело, а разобраться в ней, расшифровать – совсем другое. Есть надежда, что однажды удастся все-таки вывести из теории четкие прогнозы в отношении массы элементарных частиц, существующих в природе, и сравнить теоретические предположения с наблюдениями.

Струны призваны объяснить все известные свойства элементарных частиц. Но на каком языке? Каковы свойства самих струн? У них есть одно определяющее свойство – натяжение. Его величина играет важнейшую роль в общем согласовании теории струн с поразительными экспериментальными успехами квантовых теорий поля, рассматривающих частицы как точки в условиях низких энергий, присущих наблюдаемой Вселенной. Дело в том, что натяжение струн варьируется в зависимости от уровня энергии окружающей среды. При низких энергиях натяжение велико, и струнные петли сжимаются в точки, почему элементарные частицы таковыми и представляются. Однако при высоком уровне энергии натяжение ослабевает,

и струны приобретают более очевидную линейную форму. Их поведение становится качественно иным по сравнению с тем, что вытекает из точечных теорий. К сожалению, на данный момент наши знания и возможности не позволяют описать эти свойства в явной форме. Впервые ученые столкнулись с трудностью: извлечь физическое содержание из математических теорий. Но со временем методы, без сомнения, появятся или, кто знает, будут найдены иные подходы к теории, концептуально и технически более простые.

Подведем итоги. Мы видели, что необходимо идентифицировать силы и частицы, существующие в природе. В настоящее время мы полагаем – быть может, ошибочно, – что выявлены все фундаментальные взаимодействия. У нас есть функциональные калибровочные теории, основанные на группах симметрии, которые определяют структуру взаимодействий и фактически объясняют, почему эти силы должны существовать, тем самым позволяя физическим законам сохранять определенную симметрию. В ходу идеи объединения калибровочных теорий, но пока не удается ограничить число типов частиц, которые могут существовать в природе. В конечном счете само требование внутренней непротиворечивости сужает диапазон возможностей для единой, всеобщей симметрии природы. Однако, чтобы пройти этим путем, нужны более радикальные допущения. Мы должны отказаться от веры в то, что наиболее фундаментальные физические сущности являются точками. И здесь на первый план выходят теории струн, позволяющие ограничиться лишь небольшим числом возможных симметрий.

В нашем движении к внутренне непротиворечивому единому описанию всех сил природы та традиционная точка зрения, что наиболее фундаментальными физическими теориями должны быть квантовые теории поля, отступила перед красотой теорий струн, обещающих к тому же объяснить свойства всех элементарных частиц. В настоящее время струны остаются пока лишь абстрактной теорией. В будущем мы надеемся извлечь наружу многие их свойства. Тем не менее за любой теорией, основанной на симметрии, всегда стоит концепция, основанная на еще большей симметрии. Откуда нам знать, что теоретически обоснованный нами порядок вещей (какими бы внутренне непротиворечивыми и экспериментально успешными наши построения ни были) не является частью какой-то большой структуры, оперирующей логикой по отношению к свойствам Вселенной, о которых мы еще даже не догадываемся и которые ассоциируются с пока еще неведомыми нам силами природы, слишком слабо проявляющими себя, чтобы их можно было обнаружить непосредственным образом?

Атомы и вихри

Упреждающий плагиат – это когда кто-то крадет вашу оригинальную идею и публикует ее за сто лет до вашего рождения.

Роберт Мертон

Введение "струны" как основы для объяснения природы элементарных частиц и их взаимодействий является примером использования топологии в физике. Топология – это ветвь математики, изучающая формы объектов. Два объекта называются топологически эквивалентными, если один можно превратить в другой путем "гладкой" деформации, без какого-либо склеивания, обрезания или прокалывания. Так, например, яйцо эквивалентно шару. Лорд Кельвин первым применил топологию к решению схожей проблемы – взаимодействия не элементарных частиц, но атомов. Выявилось множество поразительных параллелей с целями и достоинствами современной теории струн.

В 1867 году на заседании Эдинбургского королевского общества Кельвин представил новую теорию атомов; письменная версия его идей затем была опубликована в журнале Общества. Большое впечатление на него произвели открытия Гельмгольца, касавшиеся поведения вихрей в жидкости, которые в ходе серии изобретательных опытов с дымовыми кольцами продемонстрировал его друг Тейт. Кельвин предложил рассматривать атомы как нечто вроде локального вихря в универсальной жидкости, пронизывающей всю Вселенную. Гельмгольц показал, что в идеальной жидкости вихрь может сохранять устойчивое состояние сколь угодно долго. Таким образом, вихри отвечают одному из необходимых требований любой теории, описывающей материю. О демонстрациях Тейта Кельвин писал:

> "Изумительный показ дымовых колец, на котором я имел удовольствие присутствовать в лекционной аудитории профессора Тейта, уменьшил на единицу число предпосылок, требуемых для объяснения свойств материи в предположении, что все тела состоят из

вихревых атомов в идеально однородной жидкой среде. Не раз мы наблюдали, как два кольца соударялись, отскакивали друг от друга и дрожали от последствий удара. Результат этот был схож с тем, как если бы в воздухе столкнулись два каучуковых кольца. Эластичность колец дыма казалась не более далекой от идеала, чем того можно было бы ожидать от каучуковых колец такой же формы, упругость которых мы хорошо себе представляем. Разумеется, эта кинетическая эластичность формы является идеальной эластичностью для вихревых колец в идеальной жидкости. Это объясняет упругость газов по меньшей мере не хуже, чем “столкновения атомов”".

Кельвин представлял себе такую картину взаимодействия между атомами, где каждый из них являл собой вихрь в заполняющей пространство эфирной жидкости. Устойчивость атомов имела в качестве параллели устойчивость вихревых колец, которую он наблюдал в опытах, и которая вытекала из сделанного Гельмгольцем открытия, что мера циркуляции системы вихрей сохраняется во всех взаимодействиях между ними. Один вихрь не может появиться сам по себе из ничего. Они могут рождаться лишь парами, где оба равны и противоположны друг другу. Кельвин также сознавал возможность объяснить огромное разнообразие атомных структур с помощью различных заузленных конфигураций, где могут образовываться вихревые трубки. Он представлял себе, что бесконечного разнообразия заузленных вихревых атомов

"более чем достаточно для объяснения как многообразия известных простых тел, так и их взаимного сходства".

Более того, вихрям доступен широчайший диапазон всевозможных узлов. Это заявление подвигло Тейта на детальное исследование с целью классификации узлов. Но самое последнее упомянутое им свойство вихрей было и самым поразительным. Дело в том, что одна из ключевых особенностей современной теории струн состоит в том, что с каждой из них ассоциируются энергии естественных колебаний, которые можно сопоставить энергии-массе элементарных частиц. Кельвин надеялся объяснить спектральные линии химических элементов через естественные моды колебаний вихрей, из которых они состоят. Опять же, он апеллирует к наблюдаемой устойчивости таких вибраций как надежной основе своей теории:

"Вихревой атом имеет строго определенные моды колебаний, зависящие только от того движения, существование которого

обусловливает их. Открытие фундаментальных мод представляет интереснейшую математическую задачу".

Подобные идеи привели Кельвина к любопытным умозаключениям: существуют атомные структуры, состоящие из цепочек взаимосвязанных вихрей, и энергия их колебаний должна зависеть от температуры, чем может объясняться феномен абсорбции, когда моды колебаний разных веществ оказываются одинаковыми.

Кельвин и его коллеги трудились над теорией примерно два десятка лет, и эта концепция всерьез воспринималась физиками того времени. Но позже от нее отказались – из-за отсутствия каких-либо практических успехов. Подвергнутая переоценке в свете современной теории струн, она ныне рассматривается как опередившая свое время идея о том, как устойчивость может быть порождением чисто топологических преобразований и наличие различных мод колебаний – источником устойчивых энергетических конфигураций материи.

Мир вне себя

И молвила: "Не в радость сны"
Волшебница Шалотт.*

Альфред Теннисон

За образом "струнного" мироустройства просматривается еще более радикальная картина. Вполне вероятно, что во Вселенной есть много такого, о чем мы не догадываемся и до чего еще не додумались даже фантазеры-космологи. Из эйнштейновской теории гравитации мы знаем, что привычное понятие силы может оказаться не более чем удобным антропоморфизмом. Классическое представление описывает физические законы как свод правил,

* Перевод С. Лихачевой.

диктующих, каким образом частицы, помещенные в традиционное пространство, геометрия которого изложена еще Евклидом, должны реагировать на действие определенных сил, возникающих между ними. Общая теория относительности рисует гораздо более сложную картину гравитации. Само присутствие частиц материи и их движение предопределяют локальную топографию пространства, в котором они находятся. Здесь уже нет таинственных сил, действующих между соседними телами. Каждый объект движется по самому экономичному из доступных в волнистом пространстве пути, которое порождают все частицы, существующие во Вселенной. Так, Солнце создает широкий ров в околоземном пространстве, и Земля движется вдоль его невидимой внутренней поверхности. Этот путь мы называем орбитой. Нет никаких гравитационных сил, действующих между телами. Все поведение объекта диктуется пространственной топографией непосредственно окружающей его среды.

Если те, кто изучает теорию гравитации Эйнштейна, и говорят о гравитационных силах, то делают это лишь в силу привычки. На смену ей пришла более элегантная и эффективная концепция динамической пространственно-временной геометрии. Ввиду чего можно предполагать, что любая теория, претендующая на звание воистину фундаментальной "теории всего" (в том числе теория струн), которая включает в себя и дальше развивает эйнштейновскую теорию гравитации, объединяя ее с прочими физическими силами, может свестись к тому, что последние тоже "растворятся". Возможно, поиск "теории всего" откроет нам глаза на тот факт, что самые фундаментальные взаимодействия, над объединением коих мы так отчаянно бьемся, подобно обитателям заколдованного острова Просперо,

"...были духи
И в воздухе растаяли, как пар.
Вот так, как эти легкие виденья...
Исчезнут и, как облачко, растают".*

Теория струн обещает сделать значительный шаг вперед по сравнению с предложенной Эйнштейном картиной, где силы прячутся в искривленной геометрии пространства-времени. Действительно, концепция струн

* Перевод Т. Щепкиной-Куперник.

содержит в себе эйнштейновскую теорию гравитации. Струнные петли ведут себя как обменные частицы гравитационного взаимодействия. В точечных системах элементарных частиц их называют гравитонами. Но есть мнения, что должна существовать возможность извлечь даже геометрию пространства-времени из характеристик струн и их топологических свойств. Пока никто не знает, как это сделать, и мы довольствуемся пониманием того, как струны ведут себя, когда помещены в неподвижное пространство-время. Но струнная картина гравитационного взаимодействия, которую мы уже успели соединить тесными узами с природой пространства-времени, обещает породить множество новых точек зрения на окружающий мир. Например, если представить, что в будущем Вселенная подвергнется коллапсу и начнет сжиматься в состояние с быстро возрастающей плотностью, то каким будет конечный результат этого процесса? Стандартная точечная теория позволяет коллапсу продолжаться до состояния истинной сингулярности, то есть достигнуть бесконечной плотности за конечное время. Но в концепции струн можно представить, что энергия коллапса растрачивается на возбуждение всех возможных вибрационных состояний струн, тем самым позволяя остановить процесс коллапса. Струны ведут себя как космические буфера. И наоборот, вполне вероятно, что начальная стадия Вселенной соответствует какому-то необычному состоянию струн, где внутренняя вибрационная энергия высвобождается и преобразуется в энергию расширения.

Мы надеемся, что именно в части исследования состояний очень высокой плотности, где на ход событий существенно воздействуют гравитация и квантовая механика, теория струн могла бы оказать наибольшее влияние на наше мировоззрение, снабдив нас концепцией квантовой гравитации. Она весьма многообещающа в этом плане, потому что, в отличие от других теорий квантовых феноменов, где при любых попытках инкорпорировать теорию гравитации неминуемо возникают внутренние противоречия, теория струн без гравитации обойтись просто не может. То, как струнная картина мира отражает сущность квантовых гравитационных феноменов, показано на рисунке 4.1. Рассмотрим струнную петлю, движущуюся через пространство и время. Ее траектория образует так называемую мировую трубку (рисунок 4.1а). Но квантовые флуктуации и неопределенности приводят к тому, что трубка будет иметь очень неправильную форму (рисунок 4.16). Теперь рассмотрим сечения флуктуирующей трубки в разные моменты времени (рисунок 4.1в). Получившаяся картина идентична той, что была бы при наличии нескольких

взаимодействующих петель, находящихся в нефлуктуирующем состоянии (рисунок 4.1а). Становится очевидно, каким образом можно включить эффекты квантовых гравитационных флуктуаций в теорию струн, допускающую простые взаимодействия петель.

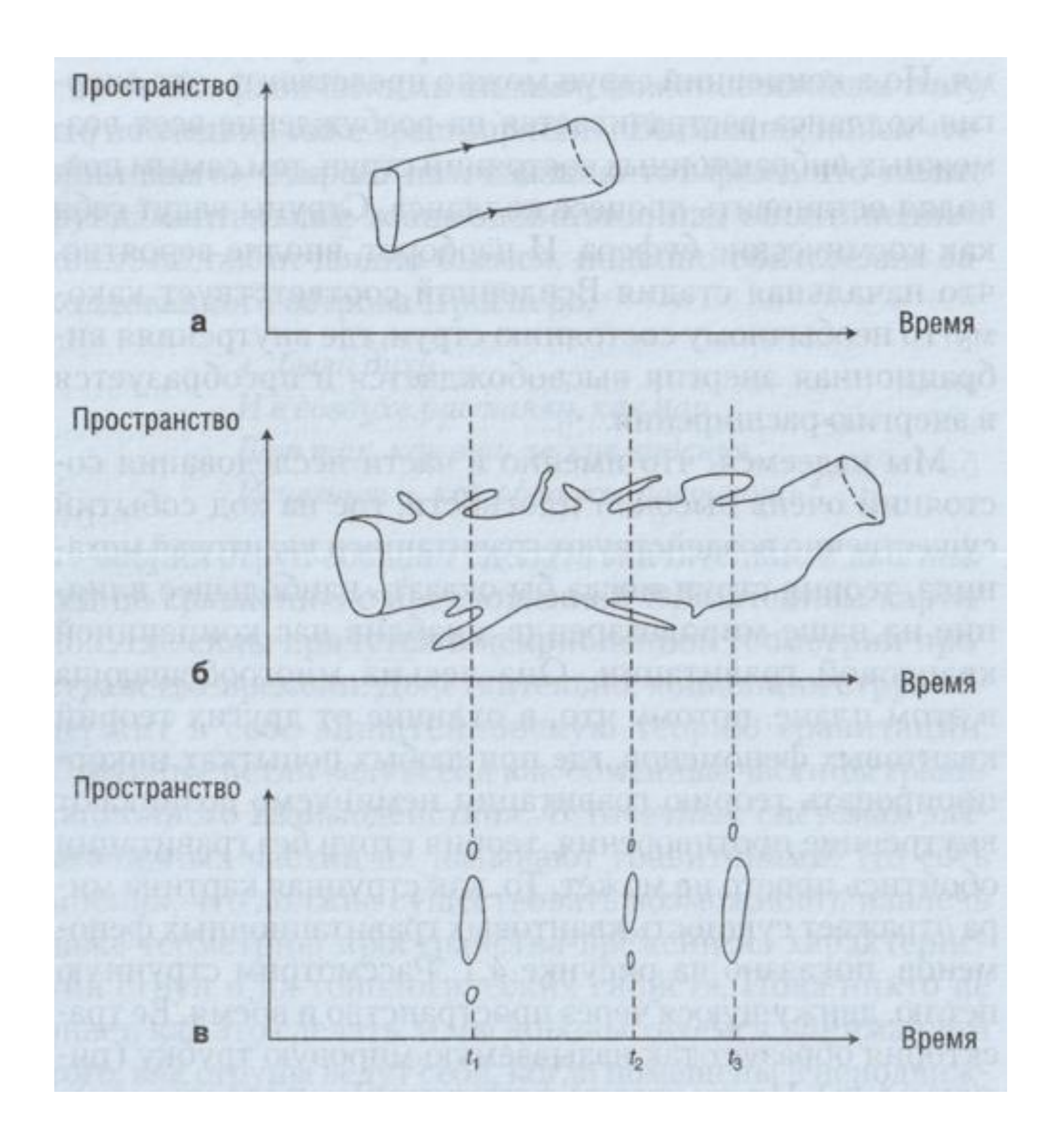


Рисунок 4.1. (а) – струнная петля, двигаясь через пространство-время, образует в нем мировую трубку; (б) – эффекты квантовых гравитационных флуктуаций приводят к искажениям и искривлениям простой мировой трубки; (в) – сечения мировой трубки (б), сделанные в моменты времени t_1, t_2 и t_3. В каждый момент времени эффекты искажений (б) базовой трубки (а) эквивалентны взаимодействиям простых петель.

Другой важной характеристикой Вселенной является предполагаемый факт наличия четырех фундаментальных сил, из которых проистекают все природные феномены. На самом деле могут существовать и какие-то другие

силы, которые очень слабо проявляют себя и потому остаются незаметными для нас. Если это действительно так, то задача построения всеобъемлющей теории будет гораздо более сложной, чем ожидалось. Еще одна важная черта природных сил – они разные, воздействуют на различные подмножества частиц и имеют разную мощь. Силы гравитационного, сильного ядерного, электромагнитного и слабого ядерного взаимодействий соотносятся примерно, как величины 10^{-39}, 1, 10^{-2} и 10^{-5}. Такая широта спектра играет важную роль в наших стремлениях познать Вселенную. Если бы эти силы воздействовали на все элементарные частицы примерно одинаково, мир был бы гораздо более сложным. Практически в любой ситуации каждое из взаимоотношений являлось бы весомым фактором. Иерархия сил уберегает нас от этого. Структуры, наблюдаемые нами во Вселенной, представляют собой состояния равновесия между парами природных сил, тогда как остальные силы играют пренебрежимо малую роль.

Тем не менее вопрос о том, ограничивается ли число фундаментальных взаимодействий четырьмя, является вполне правомерным. Более 15 лет назад было много споров в отношении так называемой пятой силы. Утверждалось, что существуют свидетельства того, что сформулированный Ньютоном гравитационный закон обратных квадратов неверно описывает взаимодействие между массами, когда гравитация слаба. Присутствующая небольшая погрешность эквивалентна добавлению другой силы. Недостающий ингредиент назвали пятой силой, хотя, строго говоря, это следовало бы интерпретировать как гипотезу о том, что закон гравитации несколько отличается от наших представлений о нем. Большинство физиков скептически относятся к возможности существования пятой силы. Самые недавние, максимально точные эксперименты не подтвердили аргументацию тех, кто поднял вопрос о ее наличии. Вместо того чтобы ввязываться в этот диспут, поучительнее было бы разобраться в том, почему споры в принципе возможны. Гравитация – исключительно слабая сила. Когда речь идет о взаимодействии атомов и повседневных предметов, окружающих нас, она слабее других сил в 10^{37} раз. Поэтому ее очень трудно обнаружить. Она затмевается влиянием других сил: скажем, магнит не позволяет гвоздю упасть на пол, несмотря на действие силы тяжести; субатомные взаимодействия не позволяют элементарным частицам рассыпаться по полу. Кроме того, сила тяготения воздействует на все: ее нельзя выключить или от нее укрыться. Если электричество и магнетизм имеют положительное и отрицательное проявления, которые могут гасить

друг друга, то гравитационный "заряд" – это масса, а она бывает только положительной. Именно поэтому гравитация доминирует в мире очень крупных объектов. По мере накопления астрономически больших масс материи чистый эффект всех прочих сил стремится к нулю, поскольку положительный заряд погашается отрицательным. Масса же может накапливаться только в положительном направлении, и сила гравитации при всей своей изначальной слабости постепенно обретает мощь. Масштабы лабораторий таковы, что в их условиях у гравитации нет шансов показать свою силу, и потому нам очень трудно с большой точностью определить истинную форму закона тяготения, тогда как размеры Солнечной системы такую возможность предоставляют. Если вы посмотрите в физических справочниках величины мировых констант, используемые в расчетах, то обнаружите, что ньютоновская гравитационная постоянная приводится в них с гораздо меньшим числом знаков после запятой по сравнению с другими константами. Мы легко могли упустить из виду какую-то новую силу, наиболее явно проявляющую себя на средних дистанциях, которые гораздо больше субатомных, но меньше планетарных. Разумеется, было бы очень странно и таинственно, хоть и не невозможно, если бы эффекты этой силы максимально проявились именно в тех и только в тех масштабах, которые – какое совпадение! – так близки нашему жизненному опыту.

Сценарий пятой силы напоминает нам о том, что существование дополнительных фундаментальных физических сил, еще не обнаруженных нами, является вполне вероятным. Следует ли считать подозрительным или это просто случайность, что все известные силы достаточно велики, чтобы знаний и навыков, приобретенных нами за тысячи лет, хватило для их обнаружения? Не кажется ли более реальным, что существуют некие дополнительные силы, по природе своей очень слабые, или очень избирательные в плане объектов, на которые они воздействуют, или имеющие маленький радиус действия? Такое возможно. Пусть они не играют большой роли в структуре непосредственно окружающей нас среды или даже в том мире, который является объектом изучения современной физики высоких энергий, но само их наличие не может не повлиять на форму фундаментальной "теории всего". От количества и природы этих призрачных сил в конечном счете зависят размеры и формы симметрий Вселенной. Чтобы их можно было полностью объединить с известными силами, должны существовать сдерживающие факторы, о которых мы пока еще даже не подозреваем. Сценарий с таким вопросом эквивалентен проблеме всеобщей симметрии, заключающейся в том, что, если бы нам удалось обнаружить

какую-то высшую симметрию, охватывающую все известные физические взаимодействия и частицы, ее всегда можно было бы включить в еще более масштабную конфигурацию, допускающую существование дополнительных частиц, между которыми имеют место новые взаимодействия. Такого рода бесконечный регресс равносилен поиску все более элементарных частиц вещества на каждом уровне. Остается надеяться, что возможные законы, не вызывающие логических противоречий, невелики числом и обладают симметриями, которые полностью и единственным образом определяют разнообразие и количество частиц или мод колебаний струн, способных логически существовать, не нарушая структуру физической реальности.

Слабая версия этой проблемы призрачных сил возникает в отдельных теориях струн. Из двух специально выбранных симметрий одна кажется продуктом двух идентичных конфигураций. Когда Вселенная остывает, известные физические силы могут естественным образом порождаться одной из копий. Но что происходит со второй конфигурацией? Казалось бы, нет оснований считать, что она тоже обязательно распадется на множество различных сил, хотя и могла бы. Представляется более естественным, что эта конфигурация остается в силе как своего рода зеркальный мир, где отраженные образы всех известных частиц материи очень слабо взаимодействуют между собой, словно гравитация действует на них в ослабленном виде. Такая зеркальная материя могла бы постоянно существовать вокруг нас. Ограничения на ее присутствие и влияние достаточно слабые и свидетельствуют об уязвимости наших представлений о силах, которые не попадают в тот сравнительно узкий диапазон, где мы можем прямым или косвенным путем обнаружить их.

Глава 5

МИРОВЫЕ КОНСТАНТЫ

Но если стоек будешь ты
И верен слову своему,
Тебя восславлю я мечом
И воспою тебя пером.

Маркиз Монтроз

Важность постоянства

Читая, как описывают естественнонаучный процесс социологи, я ловлю себя на мысли, а не такое же ли презрение испытывал бы атом, если бы смог прочитать учебник по квантовой механике.

Джеймс Трефил

В постоянстве есть что-то притягательное. Мы инстинктивно чувствуем, что те вещи, которые остаются неизменными на протяжении столетий, обязательно должны обладать какими-то очень хорошими качествами. Ведь они прошли испытание временем. Наши религиозные представления традиционно фокусировались на вере в неизменяемое Верховное существо, инвариантность которого "ныне и присно и во веки веков" абсолютно гарантирована. И несмотря на постоянно происходящие вокруг нас перемены, мы склонны полагать, что мир обладает каким-то неизменным фундаментом, общие черты которого неподвластны времени. Ученым тоже нравится так думать. Уравнения, используемые ими для описания физических законов, содержат некие постоянные величины, которые получили название фундаментальных мировых констант. Сама

формулировка свидетельствует о большом значении этих постоянных величин в мировом порядке вещей.

Одно из достоинств этих уравнений – с их помощью можно предсказывать будущее, даже не задаваясь вопросом, почему мировые константы имеют именно такие значения, а не какие-то другие. Они поддаются измерению. Если их величины слегка пересматриваются (благодаря возрастающей точности измерительных приборов), то это практически никак не отражается на общем виде решений уравнений. И с природой начальных условий у них нет ничего общего. Разумеется, к такому удачному стечению обстоятельств следует относиться с осторожностью. Если физические постоянные возникают как коэффициенты пропорциональности в каких-то частных – хоть и полезных – формулах, описывающих мир на бумаге, тогда они целиком остаются в рамках данного способа отображения действительности. Могут ли существовать какие-то альтернативные способы описания физического мира, которые привели бы к другим инвариантным величинам? История науки свидетельствует: то, что в наших взглядах казалось слишком сложным и произвольным, ныне все больше воспринимается как простое и неопровержимое. Очень часто подобное упрощение происходит благодаря тому, что величины, которые прежде рассматривались как отдельные физические константы, как выясняется, связаны между собой или составлены из комбинаций других, более фундаментальных. Каждый действительно крупный прорыв в науке идет рука об руку с ревизией или расширением наших представлений о каких-то мировых константах. Когда Ньютон более 300 лет назад открыл закон всемирного тяготения, в научный обиход вошла константа, ныне носящая его имя и конкретизирующая силу гравитационного взаимодействия между телами. Важно для Ньютона и его последователей было то, что величина гравитационной постоянной должна быть одна и та же, где бы и когда бы ее ни измеряли. Это константа связала такие внешне самостоятельные феномены, как падение яблок и движение планет.

Гравитационная постоянная Ньютона была обнаружена первой из современных физических констант. Открытие имело важные последствия не только для естествознания, но также для философии и теологии. Некоторые современники Ньютона указывали на универсальность этой константы, видя в ней знак того, что у физической Вселенной может быть только один-единственный Автор. И чаще всего на эту связь указывали приверженцы унитаризма, религиозного течения, отрицавшего Троицу, к которому принадлежал и сам Ньютон.

Наука по мере развития становилась более разборчивой в выборе вопросов для изучения, исследователей перестало устраивать отношение к физическим константам как к неким эталонам, которые можно узнать только путем непосредственного измерения. Даже те негативисты, которые на рубеже XIX и XX веков утверждали, что физика свое дело уже сделала и ученым остается лишь постепенно уточнять значения мировых констант, не допускали возможности расчета этих величин. Данный вопрос даже не стоял на повестке дня. Современные искатели "теории всего" уверены, что в конечном счете какой-то глубинный принцип логической непротиворечивости позволит определять эти физические постоянные путем простого расчета. Для этих исследователей и их предшественников, которых можно обнаружить на всех стадиях развития физики XX века, способность предсказывать безразмерные числа является тем оселком, которым проверяется эффективность предполагаемой "теории всего". Концепция, успешно предсказывающая или объясняющая значение любой мировой константы, привлечет внимание каждого физика. С этими словами охотно согласятся те, кто получает горы писем от любителей, предлагающих все новые и новые версии "теории мироздания". (Автор этих строк получил два таких письма только за прошедшую неделю.) Все подобные предложения объединяют два общих фактора (не считая того, что их авторами являются сплошь мужчины): они стремятся показать, что Эйнштейн хоть в чем-нибудь был неправ, и отчаянно пытаются вывести численные значения мировых констант из каких-нибудь таинственных комбинаций, связанных порой с такими нелепицами, как размеры пирамиды Хеопса или толкования еврейской каббалы. Психологическая мотивация первого фактора очевидна. Эйнштейн воспринимается как величайший ученый XX века, поэтому если очередному автору удастся "поймать" такого мэтра хоть на чем-нибудь, то его неминуемо назовут новым Мессией, еще более великим, нежели Эйнштейн. Но второй фактор более значим. Глядя на то, насколько ученые-эксцентрики зациклены на вычислении физических констант, можно понять, в какой мере эта задача считается высшей целью современной физики. Она четкая, понятная, и того, кто получит ответ, ждет мировая слава. Но откуда пришло это отношение к мировым константам как к священному Граалю? Думаю, ответ можно найти в некоторых научных трудах первой половины XX века, которые чрезвычайно широко популяризировались в то время.

Фундаментализм

Великий Артур Эддингтон на своей лекции объяснял, как он якобы вывел из фундаментальной теории одну тонкую структурную константу. В аудитории, среди прочих, присутствовали Гаудсмит и Крамерс. Первый из сказанного почти ничего не понял, но не сомневался, что это полная чушь. По окончании обсуждения он подошел к своему другу и учителю Крамерсу и спросил:

– Неужели все физики с годами теряют рассудок? Я побаиваюсь.

– Тебе, Сэм, опасаться нечего. Гении вроде Эддингтона, бывает, сходят с ума, но такие, как ты, с годами становятся лишь все тупее и тупее.

М. Дрезден

Чтобы правильно оценить происходившее в первой половине XX века, надо иметь в виду, что в конце XIX века центром науки была Германия. Философское наследие Канта оставило отпечаток на мировоззрении немецких физиков и по-своему окрашивало их ожидания в отношении способностей человека к познанию мира. Известные законы воспринимались как порождение человеческого разума, которое необходимо отличать от истинной природы вещей. Большинство учебников сопровождались философскими дискуссиями с позиций кантовского идеализма. В этой атмосфере рождались различные взгляды относительно целей объяснения мироздания и его констант, которые в общем очерчивали Вселенную. С одной стороны, были такие, как Эйнштейн, кто верил в сходящийся процесс описания природы посредством физических законов. В любой момент времени научная картина мира неадекватна, в ней всегда недостает каких- то важных элементов. Этот постоянный процесс ревизии научных открытий, вполне возможно, не имеет конца: сам Эйнштейн считал общую теорию относительности лишь очередным шагом к высшей истине, которая располагается на недостижимых асимптотах, поскольку

> "как бы мы ни выбирали комплекс феноменов из природы, используя критерий простоты, их теоретическое обоснование все равно когда-нибудь будет признано недостаточным... И я не сомневаюсь, что придет день, когда эта теория [общая теория относительности] тоже уступит место другой, и причины этого сегодня

мы даже предположить не можем. Я уверен, что этот процесс углубления теории не имеет границ".

Вскоре после этих слов Эйнштейн приступил к работе над своей знаменитой "единой теорией поля", которая представляла собой его видение "теории всего", призванной объединить теорию гравитации ученого с законами электромагнетизма. Если бы эти "две реальности, концептуально полностью отделенные друг от друга", можно было соорганизовать в "одну общую структуру", тогда "вся физика стала бы завершенной системой". Впоследствии ученый сосредоточил всю свою энергию на поиске "теорий, объектом которых является весь комплекс физических явлений". Эйнштейн также считал, что такая концепция не только обеспечит более глубокое и всеобъемлющее описание мироздания, но и позволит решить проблему неопределенностей квантовой теории, которая не давала ему покоя, тем самым устранив противоречия, связанные с предсказанием начала у Вселенной, вытекавшего из его общей теории относительности. Эта вера в единство природы подразумевала соответствующее отношение Эйнштейна к физическим константам: в рамках любой единой системы не должно оставаться таких, величина которых не объяснялась бы требованиями внутренней непротиворечивости теории.

"Я не могу себе представить разумную единую теорию, в явной форме содержащую числа, которые Создатель по своей прихоти мог бы выбрать иначе, что привело бы к качественным изменениям в физических законах... Теорию, которая в своих фундаментальных уравнениях явно содержит константу, пришлось бы строить из кусочков, которые логически не зависят друг от друга; но я уверен, что этот мир не таков, чтобы для его теоретического обоснования потребовалась бы столь уродливая конструкция".

Эйнштейн видел в величинах любых неустановленных физических констант божественную волю, которая – помимо и превыше физических законов и начальных условий для Вселенной – совершенно необходима для того, чтобы мир определялся единственным образом. Трудно представить, как такое возможно. Хотя дозволительно вообразить и то, что все мировые константы в конечном счете сводятся к одной или двум безразмерным величинам, которые характеризуют что-то вроде размеров Вселенной и натяжения струн. Это объяснило бы нам симметрию, присущую всем физическим законам. Однако совершенно невозможно представить, каким образом число этих констант свести к нулю. Для этого нужно потребовать,

чтобы они полностью и исключительно определялись формой самих законов природы.

Не все современники Эйнштейна разделяли его видение общей картины мира, лишенной фундаментальных констант. Некоторые, как Макс Планк, считали физическую науку преимущественно индуктивной, а потому в ней никак не возможна некая фундаментальная "теория всего", создаваемая с помощью чистой дедукции. По этой причине, по мнению Планка, задача составления всеобъемлющей концепции, которая объясняла бы величины всех базовых физических постоянных, в принципе нерешаема. Планк был далек от кантовского идеализма и критерий научного прогресса видел в систематическом движении к "как можно более полному отделению явлений внешнего мира от человеческого сознания". Поиски "теории всего" он называл поиском "единой мировой формулы". Другие, как инструменталисты Пьер Дюгем и Перси Бриджмен, считали обещанное Планком очищение научного описания от человеческих условностей недостижимым в принципе, поскольку в мировых константах они видели всего лишь доступную для человеческого разума форму объяснения непознаваемой реальности.

Артура Эддингтона можно по праву назвать величайшим астрофизиком довоенной эпохи. Он положил начало систематическому изучению структуры звезд, значительно углубил наше понимание их движения в пределах Млечного Пути и снабдил современников изысканными комментариями и объяснениями новой теории гравитации Эйнштейна, одновременно сыграв ключевую роль в ее экспериментальном подтверждении. Эддингтон являлся убежденным квакером, и любопытно было бы узнать, какую роль в его научном мировоззрении могло сыграть квакерское понятие "внутреннего света". Эддингтон был человеком робким и очень неохотно выступал перед аудиторией, зато он великолепно владел пером. Его труды были непревзойденными по стилю и изящности, их по сей день читают с интересом. Его научно-популярные книги отличались очарованием и доступностью, и потому публика читала его как никого другого из современных ему ученых. Труды Эддиншона оказали огромное влияние на философов и на тех, кто впервые знакомился с достижениями современной науки. Перед читателями представала великолепная картина из доступно излагаемых научных фактов и серьезных рассуждений; ничего подобного ни один из ведущих ученых (и уж тем более английских) того времени публике предложить не мог. По философским воззрениям Эддингтон был близок к кантианству. Он считал, что роль человеческого разума в осмыслении

физического мира никак нельзя игнорировать; она фундаментально несократима. Но если другие идеалисты видели в этом оправдание для отказа от попыток слишком углубляться в природу вещей, то Эддингтон воспринимал происхождение физических законов из человеческого разума как гарантию их фундаментальной рациональности. Он спрашивал, "возможно ли, чтобы законы, рожденные не в сознании, были иррациональными" до такой степени, что "у нас нет шансов их сформулировать"? Воодушевленный предложением Рассела и Уайтхеда о редукции математики до самых базовых логических предложений, Эддингтон стремился и физику свести к самым фундаментальным понятиям и таким образом понять, обязаны мы своими успехами в объяснении мирового устройства простоте самой природы или тому факту, что они являются плодом человеческого разума. В последний период жизни, до самой смерти в 1944 году, Эддингтон работал над тем, что он сам назвал "Фундаментальной теорией". При жизни ученого были опубликованы лишь ее разрозненные части. Это была попытка прийти к "теории всего", призванной в первую очередь дать объяснение численным значениям всех базовых физических констант путем сложных аргументов нумерологического толка. Философскую подоплеку этого труда Уиттейкер (один из биографов Эддингтона-ученого) охарактеризовал как веру в то, что

> "все количественные суждения в физике, то есть точные значения безразмерных физических констант, могут быть выведены путем логических рассуждений из качественных суждений без всякого использования количественных данных, полученных путем наблюдений".

Нетрудно видеть, что перед нами полная противоположность планковской точке зрения на материю. Эддингтон считает, что частичная – пусть и не полная, как считал Кант, – роль человеческого разума позволяет созерцать абсолютно непротиворечивую картину мира, где ни одну величину не приходится определять посредством наблюдений.

Другие физики сочли полностью провальными попытки Эддингтона объяснить величины фундаментальных физических констант. Они рассматривали его труд как отход от реальной физики, как произвольное жонглирование цифрами с целью подгонки под желаемый ответ. Справедливости ради действительно приходится признать, что за 40 лет, последовавших за посмертной публикацией этой работы Эддингтона, ничего сколько-нибудь ценного для науки, кроме громких призывов объяснить

величину физических констант, из нее извлечь не удалось. Именно работа Эддингтона (а конкретнее его сообщения о якобы имевших место частичных подтверждениях его идей) подтолкнула многих физиков-любителей пойти по его стопам и пытаться объяснять величины мировых констант посредством нумерологической гимнастики. Но наиболее любопытным обстоятельством для современника, читающего попытки Эддингтона вывести физические постоянные, является то, что используемая им логика не имеет никаких точек соприкосновения с другими научными дисциплинами. Немудрено, что Эддингтону еще при жизни было очень трудно убедить других ученых всерьез отнестись к его работе. Насмешники публиковали статьи, пародирующие его подход, и только ленивый не упрекнул его в непонятности и невежестве. Ученый очень обижался, расстраивался и ревновал к успеху своих коллег из Кембриджа (например, к Дираку). О попытках объяснить величину физических постоянных Эддингтон писал в одном из писем:

> "До меня никак не доходит, что непонятного находят люди в этой процедуре... Не сомневаюсь, что по части непонятности теорий мне очень далеко до Дирака".

Научная программа Эддингтона провалилась. Как и программа Эйнштейна, она слишком опередила свое время. Тогда мы еще совсем мало знали о тех ингредиентах, которые необходимо включить в "теорию всего", чтобы иметь шанс построить ее. Но при всех недостатках работы Эддингтона главным ее достоинством было то, что она пролила свет на проблему объяснения мировых констант. Как поборники телеологического аргумента подготовили для Дарвина все необходимые факты, чтобы он мог объяснить процесс естественного отбора, так и Эддингтон поставил вопрос величины мировых постоянных как мишень для будущих снайперов.

О чем говорят константы?

Вся эта математика отличается потрясающим нейтралитетом, а также странной способностью проникать как в вещи сверхъестественные, бессмертные, интеллектуальные, простые и неделимые, так и в естественные, смертные, чувственные, сложные и делимые.

Джон Ди

Мы видели, какое значение физики традиционно придают природным константам, но какую роль эти постоянные играют во Вселенной? Почему они считаются такими важными? Кое-какое представление об этом можно получить, обратив взор на мир атомов и молекул. Данные объекты не являются элементарными частицами; они состоят из множества и удерживаются вместе за счет равновесия противоположных сил. От размеров этих структур зависит плотность вещества, а расположение электронов в атомах предопределяет весь спектр химических свойств материи. Однако, несмотря на колоссальную сложность последней, разнообразие ее свойств и состояний, главные их характеристики определяются величинами всего лишь двух чисел. Ими являются отношение массы протона (который представляет собой ядро атома водорода) к массе электрона:

масса протона / масса электрона = 1836,152…,

и так называемая "постоянная тонкой структуры", которая равняется квадрату электрического заряда одного электрона, деленному на произведение скорости света и постоянной Планка. Эта сложная комбинация выбрана потому, что есть величина бесконечная. Результатом указанного сочетания измеренных опытным путем трех констант является странное число 1/137,036... Мы не знаем, почему эти два числа именно такие. Будь они иными, наша Вселенная была бы другой, может быть, даже невообразимо другой.

Если мы выйдем за пределы Солнечной системы, тогда к химическим силам, определяющим в общих чертах природу вещей, добавляется сила тяготения. Гравитация определяется гравитационной постоянной Ньютона, и из этой величины мы можем вывести еще одно бесконечное число

наподобие тонкоструктурной постоянной, если квадрат заряда электрона заменить произведением гравитационной постоянной и квадратом массы протона. Это крошечное число, названное "гравитационной постоянной тонкой структуры", равняется 5,9041183... х 10^{-39}. Малость этой величины в сравнении с 1/137 сообщает нам о том, что химические силы электромагнитного происхождения гораздо мощнее гравитации. Последняя действительно со структурой атомов совершенно не связана. Она всегда присутствует, но ее эффекты настолько малы в сопоставлении с электрическими взаимодействиями между протонами и электронами, что в рамках химии и ядерной физики ее можно полностью игнорировать. Размеры всех астрономических тел, начиная от астероидов и заканчивая звездами, определяются относительными величинами электромагнитной постоянной тонкой структуры и гравитационной постоянной тонкой структуры. На рисунке 5.1 изображены эффекты различных соотношений этих констант. Размеры планет и звезд являются отнюдь не случайным или заранее запрограммированным результатом определенных начальных условий Большого взрыва. Они представляют собой равновесные состояния противостоящих физических сил, которые приходят в равновесие только тогда, когда совокупная масса взаимодействующих частиц достигает определенного размера. В холодных телах, таких как Земля, силе гравитации, стремящейся сжимать вещество до как можно меньшего размера как можно большей плотности, противостоит эффект квантовой механики, известный как принцип исключения. Протоны и электроны занимают микроскопические ниши, в которые может уместиться только одна частица. Когда все частицы находятся в своих нишах, любая попытка дальнейшего сжатия встречает сопротивление. Баланс между тяготением и этой встречной силой приводит к образованию крупных стабильных холодных тел, которые мы наблюдаем в Солнечной системе.

Звезды – дело другое. Они достаточно массивны, чтобы гравитационное сжатие привело к достаточному для возникновения спонтанных ядерных реакций росту температуры. При достижении требуемого уровня температуры ядерные реакции в центральной части объекта выделяют энергию, которая постепенно пробивается на поверхность в форме тепла и света. Звезда поддерживает равновесное состояние за счет баланса между внутренним давлением и гравитацией. Это равновесие является устойчивым. Если гравитационная сила вдруг увеличится, звезда несколько сожмется, ядерные реакции ускорятся, и, соответственно, увеличится внутреннее давление, в результате баланс быстро восстановится.

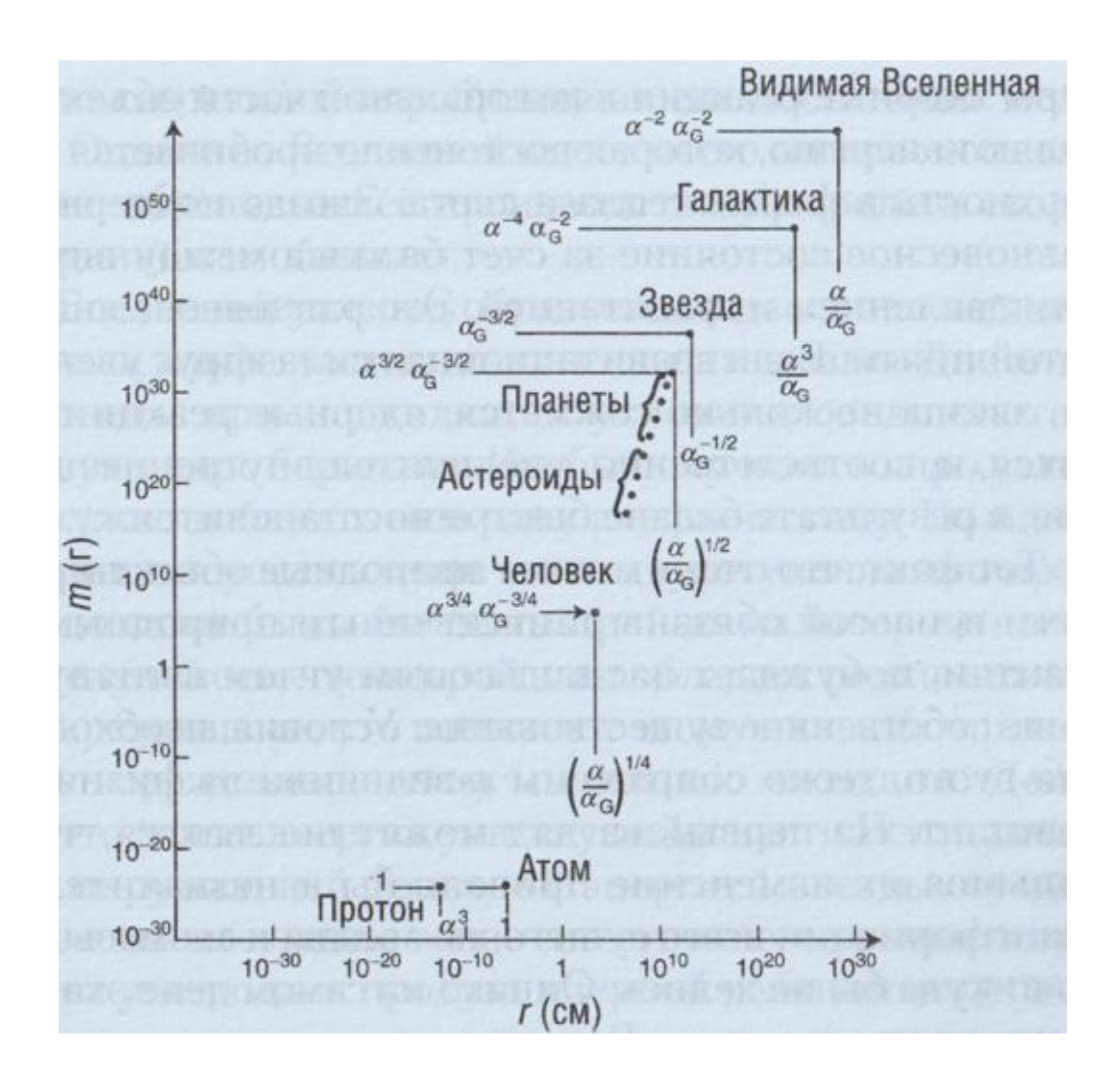


Рисунок 5.1. Массы (в граммах) и средние размеры (в сантиметрах) широкого спектра важнейших объектов, существующих во Вселенной. Сложные структуры представляют собой состояния равновесия между разными физическими силами, и их приблизительные размеры диктуются постоянной тонкой структуры $\alpha = 1/137$ и гравитационной постоянной тонкой структуры $\alpha_G = 5{,}9 \times 10^{-39}$. Для каждого объекта указана зависимость массы и размера от этих двух величин.

Тот факт, что очень многие природные объекты размерами и массой обязаны таинственным природным константам, побуждает нас под новым углом взглянуть на наше собственное существование. Условия, необходимые для этого, тесно сопряжены с величинами физических констант. На первый взгляд может показаться, что небольшое их изменение привело бы к незначительной трансформации всего сущего, но звезды и атомы все равно никуда бы не делись. Однако на самом деле эта точка зрения весьма наивна. Выясняется, что имеет место множество весьма необычных совпадений, связанных с величинами тех комбинаций физических констант, которые

являются необходимыми предпосылками нашего существования. Если бы постоянная тонкой структуры отличалась от ее реального значения хотя бы на один процент, структура звезд была бы существенно другой. И есть все основания предполагать, что в этом случае нас бы здесь не было. Дело в том, что такие важные для жизни химические элементы, как углерод, азот, кислород и фосфор, вырабатываются во время последнего взрыва умирающей в конвульсиях звезды. Они выбрасываются в космос, оттуда в планеты, а потом и в нас. Но углерод, важнейший элемент, который считается совершенно необходимым для эволюции жизни во Вселенной, должен был бы существовать в самых малых количествах, а не в том реально наблюдаемом изобилии. Это связано с тем, что взрывные ядерные реакции, которые приводят к образованию углерода на последних стадиях эволюции звезд, как правило, вырабатывают его достаточно медленно. Однако во Вселенной имеет место интересное совпадение, обусловившее производство углерода в столь неожиданном изобилии.

Во Вселенной углерод образуется в два этапа из ядер гелия, или альфа-частиц, как их еще называют. Две альфа-частицы при подходящих условиях соединяются и образуют ядро бериллия. Чтобы получилось ядро углерода, нужно добавить еще одну альфа-частицу. По идее, спонтанное осуществление этого двухступенчатого процесса должно было бы быть крайне маловероятным, но так случилось, что второй этап обладает редким качеством "резонанса", что позволяет этому явлению происходить гораздо чаще, чем мы наивно ожидали. Дело в том, что, когда энергия участвующих частиц складывается с окружающей тепловой энергией звезды, сумма оказывается несколько выше естественного уровня энергии ядра углерода, и продукт ядерной реакции легко находит естественное состояние, к которому он максимально близок. Подобное можно назвать астрономическим эквивалентом эйса в гольфе, когда мяч загоняют в лунку с первого же удара. Но и это еще не все. Мало того, что имеет место углеродный резонанс и его уровень оказался чуть выше суммарной входящей энергии внутри звезды, удивительным образом обнаружилось, что дальше возникает еще и резонанс с энергией ядра кислорода, которое образуется на следующем этапе, когда ядро углерода взаимодействует с очередной альфа-частицей. Но этот резонансный уровень несколько выше суммы энергий альфа-частицы, ядра углерода и звездной среды. Поэтому драгоценный углерод не подвергается тотальному разрушению в ходе дальнейших резонансных ядерных реакций. Эта последовательность совпадений является необходимой предпосылкой нашего существования. Наличием атомов

углерода в своем теле, которые обеспечивают потрясающую гибкость молекул ДНК, мы обязаны этим удивительным явлениям, имевшим место в недрах звезд. Величины этих резонансных уровней сложным образом обусловлены точными численными значениями физических констант.

Есть и другие примеры такого рода. Почти в каждом случае эволюция любого сложного объекта во Вселенной связана с важными совпадениями величин физических постоянных. Некоторые теологи не преминули ухватиться за данный факт, рассматривая такое положение вещей как форму божественной тонкой настройки Вселенной, призванной придать эволюции жизни больше определенности. Однако у нас нет оснований считать это чем-то большим, нежели совпадениями, которые сделали возможной эволюцию жизни, какой мы ее знаем.

Путь жизни и разума вьется среди великого множества эволюционных тупиков. Их так много и попасть в них так легко, что было бы крайним высокомерием предполагать, что при наличии углерода и времени за развитие жизни можно не беспокоиться. Кроме того, предполагать, что жизнь возникает из подходящей комбинации химических элементов, – это сугубо телеологический подход, который справедливо отвергает любой биолог. Таким образом, нет никаких причин думать, что развитие жизни во Вселенной было чем-то обязательным и неизбежным. Подобные сложные пошаговые процессы непредсказуемы в силу их сильнейшей зависимости от начальных условий и от сложных взаимодействий между развивающимся состоянием и окружающей средой. С уверенностью можно утверждать только одно: если бы физические константы отличались от наблюдаемых величин более чем на один процент, тогда основные факторы, обусловившие возникновение жизни, не существовали бы в достаточном количестве во Вселенной*. Кроме того, изменения отразились бы на самой стабильности химических элементов, и требуемых для жизни составляющих было бы не просто мало, они не существовали бы вовсе.

Интерпретировать такое положение вещей нелегко. Примем как данность, что совпадения между мировыми константами, обусловившие жизнь во Вселенной, действительно есть. Теперь пойдем еще дальше и на минутку предположим, что совпадения необходимы для эволюции любой

* Обсуждение подробностей этих совпадений и их последствий заинтересованные читатели могут найти в книге Джона Барроу и Ф. Типлера "Антропный космологический принцип" ("The Anthropic Cosmological Principle").

формы осознающих себя объектов, которые мы именуем "разумной жизнью". Зададимся вопросом: каким образом это отразилось бы на "теории всего", успешно объясняющей величины всех фундаментальных физических констант? Если такая концепция допускает только один-единственный, уникальный набор констант, тогда нам крупно повезло. Любые сколько-нибудь глубокие метафизические выводы являются чисто умозрительными, их практически невозможно ни доказать, ни опровергнуть. Но если "теория всего" покажет, что константы (хотя бы некоторые из них) обладают элементом случайности и зависят от конкретных локально разворачивающихся событий или величины, которые мы считаем константами, в принципе (или даже на практике) могут быть другими в разных концах Вселенной, тогда в бесконечном пространстве обязательно найдутся области, обладающие такой комбинацией констант, которая пригодна для эволюции сложных форм. И мы, стало быть, населяем один из таких космических оазисов жизни.

Подобные рассуждения помогают понять, почему ученым очень хотелось бы объяснить наблюдаемые величины физических постоянных. Ведь это дало бы возможность ответить на вопрос, почему существует то, что существует. Кроме того, здесь мы видим причину плодотворности самой концепции мировых констант. Наша неспособность объяснить, вследствие чего постоянная тонкой структуры равна, а не, скажем, не мешает нам пользоваться этой константой и приходить к пониманию того, как от ее величины зависят какие-то другие вещи. Это проявление некоего общего свойства Вселенной, помогающее нам приблизиться к постижению мироздания. Мы понимаем, что существует некая иерархия в поведении материальных макрообъектов, хотя нам неизвестна конечная микроструктура материи. Если бы глубинная логика, скрывающаяся за величиной тонкоструктурной константы, играла значимую роль в процессе познания всех физических процессов, куда эта константа входит, тогда бы нам пришлось туго. К счастью, не нужно знать все, чтобы узнать что-то.

Но чтобы оценить важность мировых величин, нет необходимости углубляться в мир элементарных частиц или астрономии. Для современных технологий и коммуникаций жизненно необходимы высочайшие стандарты измерения времени. По этой причине в наиболее развитых странах существуют специальные службы, в задачу которых входит хранить и поддерживать точные меры времени, длины, массы и т. п. В Великобритании

эта обязанность возложена на Национальную физическую лабораторию, а в США – на Национальное бюро стандартов, базирующееся в Вашингтоне. Понятно, что этим организациям нужен абсолютно фиксированный эталон времени. Его используют для калибровки всех прочих устройств измерения времени. На секундочку попробуем, вслед за древними, применить в качестве подобного эталона песочные часы. В них для учета времени используется сила гравитации. Сама идея основывается на факте, что в локальном поле тяготения Земли все предметы падают с одинаковым ускорением. Но ясно, что такое устройство не годится в качестве универсального даже в земных условиях, не говоря уже о Вселенной в целом. Невозможно сделать абсолютно одинаковыми отверстия, через которые просыпается песок, и размеры песчинок неизбежно будут разные, и шероховатость поверхности, и угол наклона будут меняться от образца к образцу. Все эти факторы приводят к тому, что каждый экземпляр песочных часов будет показывать свое время, отличное от других. Не существует уникального, единственного в своем роде соотношения между течением песка в часах и ходом времени. Проблему можно попробовать преодолеть при помощи маятниковых часов. В них тоже используется тяготение – на том основании, что локальная сила тяжести диктует период колебаний маятника. Но эта фаза зависит еще и от длины маятника. Поэтому каждый из них будет неизбежно отличаться от другого. Кроме того, реальная сила тяжести в разных местах на поверхности Земли неодинакова; она меняется от экватора к полюсам из-за вращения планеты вокруг своей оси, вследствие чего ее форма несколько сплюснута. Если перебраться с теми же часами на другое небесное тело, где сила тяжести иная, скорость колебания маятника будет совершенно отличной. Чем крупнее планета, тем быстрее качается маятник (грубо говоря, скорость будет возрастать пропорционально квадратному корню из радиуса планеты). Еще можно воспользоваться часами электрическими, которые сейчас есть почти в каждом доме. Они гораздо точнее маятниковых, и их точность основывается на постоянном периоде переменного тока в электрических сетях. Тем не менее, хотя частота переменного тока довольно устойчива и удерживается вблизи 50 колебаний в секунду, она все же подвержена непредсказуемым вариациям, которые могут различаться в разное время и в разных местах. Такой стандарт нельзя использовать как универсальный, но для бытовых целей он вполне пригоден. Задача поиска истинного эталона требует дать определение тому, что мы понимаем под единицей времени – чтобы она оставалась одинаковой, несмотря на то, когда и где измеряется время. Это стремление к универсальности естественным образом побуждает искать стандарт,

который зависит только от мировых констант. И именно такой подход в существующих эталонах времени реализован. Службы точного времени избегают использовать какие-либо характеристики Земли или ее поля тяготения, а вместо этого фокусируют внимание на частотах естественных атомных переходов между энергетическими состояниями. Время одного такого перехода в атоме цезия определяется через величину скорости света в вакууме, массы электрона и протона, постоянную Планка и заряд электрона. Все величины считаются физическими константами. Промежуток времени, равный одной секунде, определяется через соответствующее количество колебаний. Этот способ определения может показаться слишком сложным, но он очень эффективен. По идее, он позволяет точно объяснить наши представления о времени даже обитателям далеких галактик. Жители Андромеды вряд ли поймут, что мы имеем в виду, когда говорим о продолжительности суток или года, потому что эти единицы тесно привязаны к реалиям нашей Солнечной системы (сутки – период полного оборота Земли вокруг своей оси, а год – время, за которое планета делает полный виток вокруг Солнца, и ни та, ни другая единица не являются истинными константами), но они должны, если общаются с нами с помощью радиосигналов, быть знакомы с концепциями, посредством которых определяются физические постоянные. Можно даже утверждать, что, поскольку они не могут не знать о мировых константах, между нами обязательно должно быть много общего. Или необязательно?

Переменчивые константы

В мире нет ничего постоянного, кроме непостоянства.

Джонатан Свифт

Здесь есть два момента. Если внеземным цивилизациям и известны мировые константы, являются ли они для них теми же? И вообще, являются ли так называемые константы константами? Первый вопрос одновременно философский и социологический. Встав на реалистичную точку зрения науки, приходится признать, что существует одна в своем роде структура физической Вселенной, которую ученые открывают, а не изобретают.

Мировые константы не зависят от нашего сознания и сведений о них. Они не являются концепциями, придуманными людьми просто ради удобства и придающими смысл наблюдаемым фактам. Получается, что любая цивилизация, достигшая определенных вершин научно- технического прогресса, в ходе научных поисков открыла бы точно такие же реалии и базовые понятия. Используя другую символику или константы, сформулированные ради удобства несколько иначе, они и наши константы признали бы фундаментальными, легко найдя способ преобразования одних в другие. Это достаточно оптимистическое предположение является основой некоторых проектов по организации поисков внеземной жизни. Сообщения наших космических кораблей, покидающих Солнечную систему после выполнения возложенной на них миссии, а также частоты, на которых посылаются в космос радиосигналы на тот случай, если их кто-то услышит, должны основываться на фундаментальных стандартах, диктуемых физическими постоянными. Подразумевается, что это должно быть понятно любому технологически развитому обществу. Но не исключено, что такая логика мышления ошибочна. Если наши математика и физика по большей части придуманы нами с целью приблизительного описания какой-то гораздо более глубокой истинной реальности, тогда мы не вправе рассчитывать на то, что другая цивилизация пошла тем же путем. Наши научные концепции развивались в ответ на возникающие социальные и практические проблемы, требовавшие решения в конкретных условиях планеты Земля. Вполне возможно, что кажущиеся фундаментальными математические понятия, на основе которых построена вся наша наука, такие, какие они есть, просто потому, что человеческому разуму проще и удобнее оперировать ими. Особенности последнего – по крайней мере, отчасти продукт эволюционного процесса, который неотделим от обстоятельств, окружающих нас на Земле. В других мирах среда была бы другая, а значит, и результаты иными. Мы можем быть уверены в существовании только одного общего фактора. Должна иметь место тесная связь между образом действительности, сложившимся в умах представителей нашей или иной цивилизации, и истинной природой тех ее аспектов, которые необходимы для выживания. Серьезный разлад между самой реальностью и ее образом свел бы возможность эволюционного успеха к нулю. Однако простор для потенциальных расхождений между цивилизациями остается огромным. Например, на нашей планете воздух довольно прозрачный, что позволяет нам видеть по ночам много звезд. Если же на планете небо всегда затянуто плотной пеленой туч и всегда темно, тогда звук становится более эффективным средством коммуникаций, нежели

свет. Такое отличие могло бы существенно сказаться на развитии цивилизации, и наука больше внимания уделяла бы изучению звуковых, а не электромагнитных феноменов. Главным аспектом всей проблемы является статус математического языка, на котором излагаются наши выводы относительно мировых постоянных. Эта грань Вселенной открыта или придумана нами? Мы вернемся к данному вопросу в последней главе и обсудим его более подробно.

А как быть с тем, что постоянные действительно постоянны? До сих пор мы предполагали, вслед за большинством физиков, что такие величины, как гравитационная постоянная Ньютона, заряд электрона или постоянная тонкой структуры, являются истинными константами. Это не просто благое пожелание, их можно проверить множеством способов. Наблюдая за удаленными астрономическими объектами, например, квазарами, мы видим их такими, какими они были миллиарды лет назад, потому что именно столько времени нужно световым сигналам, чтобы преодолеть расстояние между этими объектами и земными телескопами. Подобный временной лаг позволяет нам проверить, идентичны ли физические константы, диктующие относительные свойства разных типов света, который давным-давно излучали эти далекие источники, постоянным, сегодня наблюдаемым нами на Земле. Если какие-то физические константы имели в далеком прошлом иные значения, эти различия обязательно проявились бы, превышай они хотя бы одну миллиардную долю процента. Мы также знаем, что если такие константы, как электромагнитная или гравитационная постоянная тонкой структуры, в прошлом были другими, то многие события на самых ранних стадиях развития Вселенной происходили бы совсем иначе. В частности, полностью рухнуло бы великолепное соответствие между в изобилии наблюдаемыми во Вселенной водородом, гелием, дейтерием и литием и тем, что должно было, согласно теоретическим расчетам, образоваться через несколько минут после Большого взрыва. Чтобы при изменении констант, участвующих в этих процессах, множество указанных элементов существенным образом не изменилось, допустимые колебания значений постоянных должны находиться в пределах от одной десятимиллиардной до одной стомиллионной процента.

Существуют обстоятельства, в которых от величин, которые мы называем физическими постоянными, можно ожидать вариаций во времени или пространстве. Мы наблюдаем три измерения последнего, но физики обнаружили, что самые элегантные и полные теории элементарных частиц, включая теории струн, предсказывают, что измерений в пространстве

должно быть больше трех (число их может достигать 9, а в некоторых случаях даже 25). Чтобы согласовать такое с наблюдаемым порядком вещей, всем "лишним" измерениям необходимо свернуться до микроскопических размеров. Представим, что это действительно так. Тогда истинными физическими константами являются те, которые предопределяют природу всего пространства, а не только его трехмерного среза. Кроме того, если мы рассмотрим величины, являющиеся мировыми константами в нашем трехмерном подпространстве, то обнаружится, что они должны меняться в такой же мере, насколько делаются иными средние размеры любых дополнительных измерений пространства. Наблюдения за неизменными константами говорят нам о том, что если дополнительные измерения пространства действительно существуют, то на сегодня они чрезвычайно инертны.

Подобный сценарий, предусматривающий существование дополнительных измерений пространства, представляет собой нечто большее, нежели плод буйной фантазии. Дело в том, что теории струн построены в условиях многомерного пространства. Более того, чудесные математические свойства, позволяющие этим концепциям обходиться без бесконечностей, присущих точечным теориям элементарных частиц, требуют, чтобы пространство имело ни много ни мало 9 или даже 25 измерений. В рамках космологии эта ситуация представляется таковой: на самых ранних стадиях развития Вселенной все измерения существуют совершенно равноправно, а затем, по какой-то неизвестной причине, их пути расходятся. Оставшиеся три развернутых измерения образуют сегодняшнюю видимую Вселенную, имеющую 15 миллиардов световых лет в поперечнике. Остальные измерения статично пребывают в микроскопическом состоянии. Как это произошло, почему три (и только три) измерения избежали этого вечного заточения, остается загадкой.

Здесь возникает интересный принципиальный момент. Если действительно существуют дополнительные измерения пространства, тогда истинные мировые константы должны определяться в масштабе всех измерений. Поэтому константы трехмерного пространства могут оказаться не вполне фундаментальными. Возможно, они окажутся совсем не теми, о которых когда-нибудь сообщит нам истинная "теория всего". Если так, нам придется распутывать причины, почему три измерения остались развернутыми и процесс продолжается, о чем свидетельствует факт расширения Вселенной, в то время как остальные измерения свернуты и статичны. Вполне возможно, законы природы здесь ни при чем. Нельзя

исключить, что на квантовом гравитационном уровне в процессе участвуют какие-то случайные элементы, которые, возможно, даже варьируются в разных местах Вселенной. Если ситуация такова, тогда константы, остающиеся в трех развернутых измерениях пространства, получают значения, которые изначально были случайными, по меньшей мере, отчасти.

Многие годы поиски свидетельств того, что традиционные физические постоянные могут быть непостоянными, никаких результатов не приносили. Если что и удавалось выудить из лабораторных экспериментов и астрономических наблюдений, то только все более жесткие ограничения на масштаб потенциально возможных изменений. Положение начало меняться только в 1999 году, когда на подмогу ученым пришли невероятно мощные новые телескопы, позволившие иным способом исследовать свет далеких квазаров. Джон Уэбб, Майкл Мерфи, Виктор Фламбаум, Владимир Дзюба, Крис Черчилль, Джейсон Прохазка, Арт Вольф и я применили новую методику анализа света от далеких квазаров. Мы смотрели на расстояния между спектральными линиями, образованными поглощением света квазаров различными химическими элементами в облаках пыли, расположенных между квазарами и нами. Эти смещенные в красную сторону (вследствие расширения Вселенной) расстояния очень сильно зависят от величины постоянной тонкой структуры. Сравнивая наблюдаемые величины с лабораторным анализом такого же спектра здесь и сейчас, мы можем судить о том, изменилась ли интересующая нас "константа" за последние 12 миллиардов лет. По этой методике к настоящему времени обследовано 147 квазаров. Результаты, собранные и проанализированные за два года, оказались весьма неожиданными и в потенциале многообещающими. Мы обнаружили устойчивые и существенные расхождения в расстояниях между спектральными линиями света из далекого прошлого и света сегодняшнего. Сравнение показало, что постоянная тонкой структуры в те времена, когда квазары испустили исследованный нами свет, была на шесть миллионных меньше, чем сейчас. В настоящее время многие астрономы продолжают наблюдения, стремясь выяснить, является эта потрясающая нестабильность одной из фундаментальных мировых констант реальностью или же речь идет о какой-то неучтенной систематической ошибке в процессе сбора данных. В прошлом году появились свидетельства других астрономов о наличии схожих крошечных расхождений в массах электрона и протона.

Существует возможность создания достаточно простых теорий, учитывающих непостоянство тонкоструктурной константы. Надо отметить, что любые вариации ограничиваются такими сильнейшими сдерживающими

факторами, как необходимость сохранения энергии, импульса и воздействие тяготения. Мы видим, что константа может чрезвычайно медленно меняться – возрастая со скоростью логарифма – в строго определенный период истории Вселенной, начиная с момента, когда миру исполнилось 300 тысяч лет, и заканчивая возрастом 9 миллиардов лет (на сегодня с момента предполагаемого начала расширения прошло 13,7 миллиарда лет). В другие эпохи постоянная тонкой структуры оставалась стабильной. Только этим можно объяснить, почему изменение константы, наблюдаемое в свете квазаров (если оно действительно есть), не имело никаких других видимых эффектов в самый ранний период существования Вселенной или в лабораторных экспериментах, где эффектов, отмечаемых в квазарах, обнаружить не удалось. Единственно возможное место проявления – давнишняя геохимическая история Земли. Два миллиарда лет назад на территории нынешнего Габона (Западная Африка) сложная последовательность геологических катаклизмов естественным образом породила цепную ядерную реакцию под земной поверхностью. Это привело к тому, что сейчас в тех местах мы видим богатые месторождения урана и других радиоактивных элементов. Необычность данной цепной ядерной реакции – она была обусловлена крайне маловероятным расположением энергетического уровня в ядре самария, что позволяло захватывать нейтроны с гораздо большей эффективностью, чем это случилось бы в других обстоятельствах. Два миллиарда лет назад уровень энергии должен был иметь строго определенное значение. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности изменения тонкоструктурной константы за последние два миллиарда лет, но, к сожалению, это относится к тому периоду времени, а сегодня Вселенная расширяется слишком быстро и в ней доминирует темная энергия.

Космологическая константа

Ничто. Ничто – это приводящая в трепет, но, по существу, непознаваемая концепция, особенно высоко ценимая писателями мистической или экзистенциалистской ориентации, а большинству прочих людей внушающая чувство тревоги или страха.

Философская энциклопедия

Как и следовало ожидать, авторы современных концепций, претендующих на роль "теории всего", пытаются что-то рассказать о природе мировых констант и их величинах. Главный на сегодня кандидат – струнная картина мира элементарных частиц, отличающаяся совершенно новым взглядом на то, что в мироздании является наиболее фундаментальным, и опорой на принцип математической непротиворечивости, сужающий круг претендентов на великую симметрию, охватывающую все сущее, – стоит на том, что величины физических констант должны содержаться в самой теории. Они спрятаны где-то в сложных математических хитросплетениях. К сожалению, способ выудить информацию из недр концепции пока не найден. Более того, как мы только что видели, это извлечение может оказаться только первым этапом большого и трудного пути, потому что одно дело – узнать, что говорит теория о константах 9- или 10-мерного пространства, но совсем другое – понять, как отфильтровать информацию, чтобы добраться до определения величин констант, наблюдаемых нами в трехмерном мире. Есть еще одна проблема. То, что появляется из "теории всего" в качестве фундаментальной константы, совсем необязательно принадлежит к числу тех величин, которые мы привыкли называть физическими постоянными. Вполне возможно, мы еще очень далеки от понимания действительно фундаментальных констант, потому что наше знание ограничивается преимущественно низкоэнергетической средой, являющейся необходимой предпосылкой эволюции и выживания живых организмов. Однако современная физика в поисках ответов устремляется ко все более высоким энергиям и средам, максимально удаленным от наших интуитивных представлений и опыта. В теории струн, например, самой фундаментальной величиной представляется натяжение струн, а не какая-то классическая мировая константа. На первый взгляд проблема не столь серьезна. Ситуация кажется всего лишь непривычной и неудобной.

Предположим, мы разобрались в процессе, в ходе которого из множества первоначальных измерений пространства три развернулись и продолжают в том же духе, а остальные остались свернутыми, что позволило нам рассчитать численные значения фундаментальных констант "теории всего". Однако мы должны понимать, что константа константе рознь. Мы для удобства обсуждения сваливаем их в одну кучу, но величины есть более и менее фундаментальные. Мы ожидаем, что константы наиболее фундаментальные должны полностью предопределяться внутренней логикой "теории всего". Но остаются еще и другие, которые вносят свой вклад в конкретные процессы, происходящие во Вселенной, и меняют свои значения непредсказуемым образом. "Теория всего", возможно, оставит нерешенным вопрос о предсказании величин наблюдаемых мировых констант.

Несмотря на такое возможное осложнение, мы все были бы чрезвычайно рады, если бы какая-нибудь система, претендующая на роль "теории всего", смогла правильно предсказать величину хотя бы одной физической постоянной. До недавнего времени физики надеялись, что это под силу теории струн. Тогда, чтобы проверить концепцию, нам останется лишь сравнить теоретический прогноз с наблюдаемым результатом. Но недавно у нее появился конкурент – "теория (почти) всего", поднявшая вопрос о том, возможно ли вообще существование действительно фундаментальных констант, которые остаются неизменными, несмотря на воздействие каких бы то ни было событий, происходящих в пространстве и времени. К этой теории-сопернице мы сейчас и обратимся.

Есть одна константа, объяснить которую легче, чем все остальные. Это та, что равна нулю. В 1916 году, когда Эйнштейн впервые применил свою новую теорию гравитации ко Вселенной в целом, на него огромное влияние оказывали философские предрассудки прошлого, смысл которых сводился к существованию статичного абсолютного пространства, в котором происходят все наблюдаемые движения объектов. Сама идея расширения Вселенной воспринималась как нелепая и неприемлемая. Эйнштейн обнаружил, что расширение было прямым следствием его теории, и стал разбираться, как можно скорректировать концепцию, чтобы расширяющиеся (а заодно и сжимающиеся) вселенные в ней появиться не могли. Он понял, что ситуация разрешима, если включить в теорию новую физическую константу, которую математический аппарат системы допускал, но необходимости в ней не было. Эта новая константа, названная космологической постоянной, действовала как дальнобойная сила, противодействующая гравитации.

Баланс между ними мог обеспечить статичность и неизменность Вселенной, но эта возможность пропадала при исключении космологической константы из теории. Однако впоследствии было показано, что, хотя статичная Вселенная в принципе может существовать, на практике такое состояние продлилось бы недолго, поскольку равновесие между притягивающей силой гравитации и отталкивающей космологической константой по природе является неустойчивым. Попробуйте поставить карандаш вертикально: малейшее дрожание или другое внешнее воздействие приводят к необратимым переменам. Если же эйнштейновская статичная Вселенная не будет идеально уравновешена (а в реальном мире такой идеал совершенно невозможен в силу постоянно меняющихся флуктуаций и неоднородностей, которые всегда присутствуют во Вселенной, – взять даже нас с вами), она тут же начнет либо сжиматься, либо расширяться. Когда в ситуации разобрались, резко возрос интерес к исследованиям расширяющейся Вселенной, и вот в 1929 году Хаббл сделал монументальное открытие: Вселенная действительно расширяется.

Статичная Вселенная Эйнштейна оказалась мертворожденной концепцией, и ученый впоследствии сожалел, что ради самой идеи ввел в теорию космологическую константу, назвав ее "крупнейшей ошибкой в своей жизни", поскольку из-за нее он упустил возможность стать автором самого великого открытия всех времен – Вселенная расширяется. Но космологическая константа отказывается уйти с научной сцены. Можно сколько угодно говорить, что она не нужна, но убедительных резонов исключать ее из уравнений Эйнштейна нет. Многие смотрели на космологическую константу как на аксессуар новой теории гравитации Эйнштейна и предлагали убрать на том основании, что в ньютоновской теории гравитации для нее аналога нет. Ведь если ее оставить, получается, что концепцию Ньютона, к которой теория Эйнштейна сводится в тех случаях, когда сила всех гравитационных полей очень мала и все движения происходят на скоростях, далеко уступающих скорости света, следует признать безнадежно устаревшей и ненужной. Если знаменитый ньютоновский закон обратных квадратов гласит, что между двумя телами, разделенными расстоянием d, возникает гравитационная

сила $\alpha\ 1/d^2$, "*"

то у Эйнштейна закон гравитации выглядит так:

сила $\alpha\ 1/d^2 + \Lambda d$, "**"

где Λ – космологическая постоянная.

Интересно отметить, что Ньютон мог прийти к эйнштейновской формуле еще 300 лет назад. Одна из проблем его поисков, вынуждавшая многие годы откладывать публикацию "Начал", главного труда его жизни, заключалась в необходимости оправдать диктовавшееся силой привычки представление о том, что гравитационное притяжение со стороны шара идентично силе притяжения, создаваемой такой же по величине точечной массой, сосредоточенной в центре шара. Со временем Ньютон установил, что это так называемое сферическое свойство является верным для закона обратных квадратов (см. ситуацию "*"), который лег в основу его теории всемирного тяготения, но не выполняется для других гипотетических законов, таких как закон обратных кубов или обратных четвертых степеней расстояния.

Но если бы Ньютон задался вопросом: "Каков самый общий вид силы, сохраняющий сферическое свойство?", который впоследствии задал себе французский математик Симон де Лаплас, то он понял бы, что ответ надо искать в ситуации "**", Таким образом, если бы основополагающим принципом при формулировке ньютоновского закона всемирного тяготения было выбрано сферическое свойство, тогда космологическая константа была бы допустимой, но не обязательной. Точно так же, как это было в ситуации с эйнштейновской общей теорией относительности.

Каков статус космологической постоянной в настоящее время? Примерно до 1997 года в этом вопросе отмечался почти полный застой. Наблюдения с помощью приборов не давали никаких свидетельств ее существования. Получалось, что численное значение этой константы должно быть менее 10^{-55} сантиметров квадратных. Это настолько мало, что большинство физиков были склонны думать, что на самом деле она равна нулю. Со временем, говорили они, мы найдем простой принцип в "теории всего", который объяснит нам, почему она такова.

Однако вскоре ситуация изменилась. В конце 1990-х годов две группы астрономов, используя новейшую технику, стали находить свидетельства того, что космологическая постоянная отнюдь не равна нулю. Изучая сверхновые вспышки и угасания вблизи самого края видимой Вселенной, они смогли проверить расширение Вселенной на таких расстояниях, где второе слагаемое в законе "**" имеет шанс вступить в игру, если значение Λ достаточно велико. Выяснилось, что на довольно больших расстояниях расширение Вселенной постепенно переходит из состояния замедления, диктуемого всемирным притяжением, в состояние ускорения, объясняемое

всемирным отталкиванием. Именно такого поведения от космологической константы и ждали. По-видимому, величина этой постоянной близка к 10^{-56} сантиметрам квадратным и на нее приходится 72 процента гравитационной массы Вселенной.

Складывается очень странная ситуация. Космологическая константа имеет крошечную величину, но будь она хотя бы в 10 раз больше, нас бы здесь не было. Ускоренное расширение Вселенной началось бы на более раннем этапе, и звезды с галактиками не сформировались бы. Расширение было бы столь стремительным, что локальное гравитационное притяжение не смогло бы ему противостоять. А сейчас мы имеем перед собой картину, в которой ускоренное расширение началось после того, как Вселенная достигла трех четвертей ее нынешнего объема (см. рисунок 5.2).

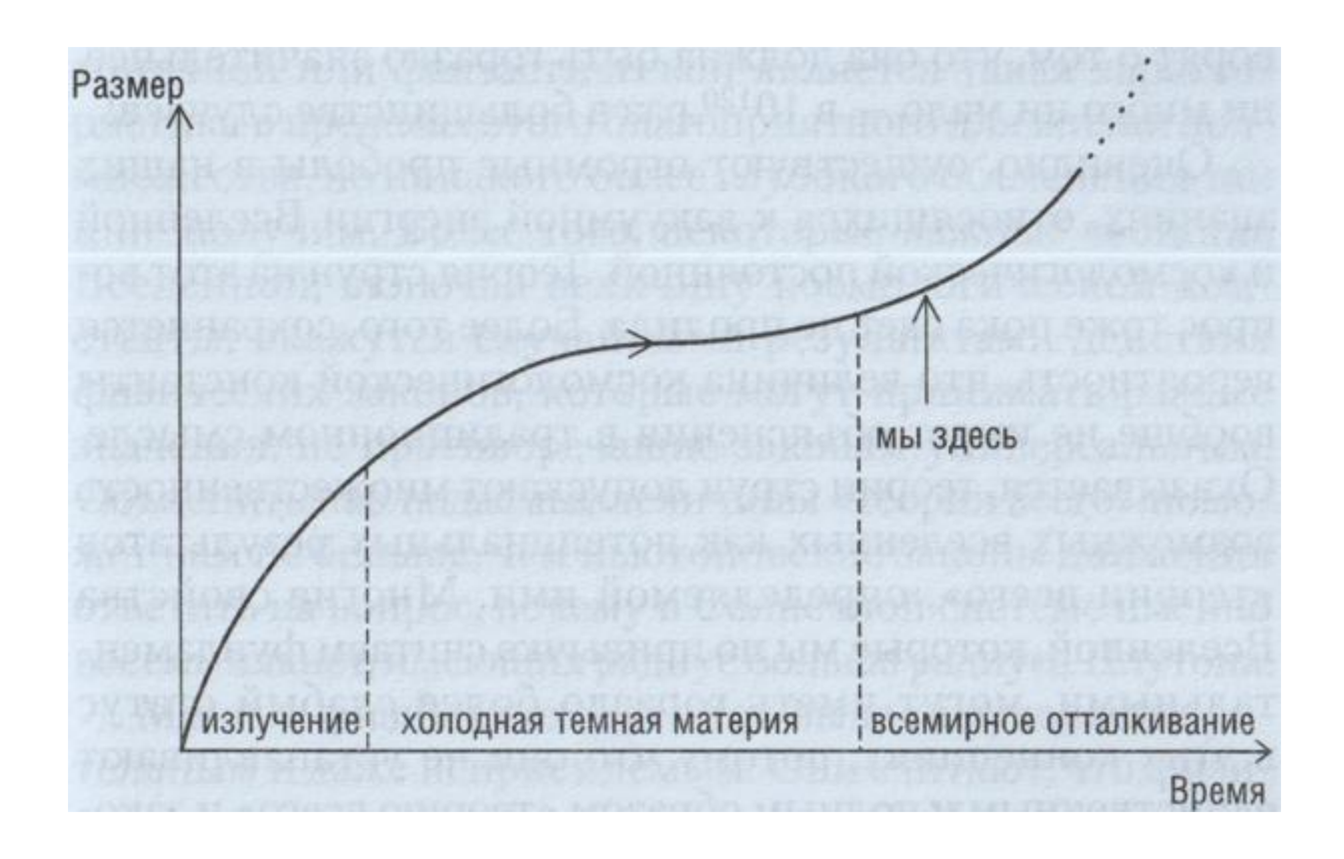


Рисунок 5.2. График изменения расстояний между удаленными точками ("размер") с течением времени в расширяющейся Вселенной, где космологическая постоянная постепенно начинает ускорять расширение. Эта кривая иллюстрирует наиболее вероятное прошлое и будущее наблюдаемой Вселенной. Ранний период ускоренного расширения, где доминирует излучение вещества, сменяется периодом замедления, вызванного гравитацией холодных темных форм материи, но, когда Вселенная достигает примерно трех четвертых своего нынешнего размера, процесс расширения вновь ускоряется.

Космологическая постоянная истолковывается физиками как мера энергии квантового вакуума Вселенной. В квантовой системе понятие вакуума несколько отличается от наших обычных представлений. Это не просто "пустота", "ничто". Скорее, то, что остается, когда из системы удаляется все, что только позволено: это состояние наименьшей энергии. Получается, энергия вакуума необязательно равна нулю и возможно несколько разных состояний с одной и той же минимальной энергией. Кроме того, состояние минимальной энергии может меняться с течением времени, так что в какой-то момент энергия перестает быть минимальной и система быстро (или медленно) переходит из одного вакуума в другой. Если смотреть на вещи под таким углом, малая величина космологической константы, которую мы наблюдаем сегодня, сообщает нам об энергии вселенского вакуума. К сожалению, это не объясняет нам, почему все-таки у нее такая странная величина. Все теории элементарных частиц говорят о том, что она должна быть гораздо значительнее, ни много ни мало – в 10^{120} раз в большинстве случаев!

Очевидно, существуют огромные пробелы в наших знаниях, относящихся к вакуумной энергии Вселенной и космологической постоянной. Теория струн на этот вопрос тоже пока свет не пролила. Более того, сохраняется вероятность, что величина космологической константы вообще не имеет объяснения в традиционном смысле. Оказывается, теории струн допускают множественность возможных вселенных как потенциальных результатов "теории всего", определяемой ими. Многие свойства Вселенной, которые мы по привычке считаем фундаментальными, могут иметь гораздо более слабый статус в этих концепциях, потому что они не устанавливают единственным и полным образом "теорию всего" и законы, конкретизируемые ею. Количество вакуумных состояний Вселенной может оказаться невообразимо большим (одна из оценок дает цифру 10^{1500}), и каждое из них характеризуется разными наборами величин для многих физических констант, включая космологическую постоянную, и различными структурами астрономической Вселенной. Хуже того, они допускают даже разное количество фундаментальных физических сил и развернутых измерений пространства. В такой ситуации максимум, что мы можем надеяться извлечь из "теории всего", – что-то вроде вероятности, с которой Вселенная обладает таким-то набором сил, констант и других свойств. В этом случае фундаментального объяснения того, почему космологическая константа такая, а не иная, мы не получим. Мы можем определить диапазон величин космологической константы, допускающих существование разумных

"наблюдателей". Ясно, что мы живем во Вселенной, обладающей такими константами и свойствами, которые укладываются в подмножество потенциальных возможностей, благоприятных для эволюции жизни, *независимо от априорной вероятности этого с точки зрения "теории всего"*. Быть может, мы сумеем определить, насколько типичной или фантастической является такая характеристика в пределах этого благоприятного для жизни подмножества, но никакого более глубокого объяснения так и не получим. Более того, некоторые важные свойства Вселенной, включая величину космологической константы, окажутся случайными результатами действия физических законов, которые могут принимать разные значения, не противоречащие законам универсальным. Объяснить наблюдаемые величины "теория всего" поможет нам не больше, чем ньютоновские законы движения ответить на вопрос, почему в Солнечной системе именно восемь планет, имеющих радиус больше радиуса Плутона.

Многие физики находят этот вывод неудовлетворительным и даже неприемлемым. Они считают, что физические законы должны объяснять всё. Увы, Вселенная построена не так, как нам удобно. Было бы очень подозрительно, если бы на все вопросы о Вселенной можно было ответить уже сейчас, используя современные технологии. В других научных дисциплинах никто не смущается по поводу существования проблем, которые научные теории не в состоянии решить из-за их повышенной чувствительности к хаотичным возмущениям или случайным нарушениям симметрии. Возможно, придется признать, как должное такой же индетерминизм в части познания нами свойств Вселенной в целом.

В этой ситуации следует принять к сведению, что нет никаких оснований думать о нашей Вселенной как о "самой вероятной" в плане определения величин физических констант. Напротив, мы уже видели, что наше существование, как и других потенциальных наблюдателей, стало реальным только в силу того, что величины многих констант очень близки к наблюдаемым. Стоит их чуть изменить – и наблюдателей не станет. Поэтому наблюдаемые величины физических констант нужно сравнивать не с теми, которые предположительно проистекают из "теории всего", но *с наиболее вероятными при соблюдении условия, что они допускают эволюцию наблюдателей*. И величины, отвечающие последнему требованию, могут сильно отличаться от тех, которые являются допустимыми в отсутствие ограничивающих условий (см. рисунок 5.3). Сам факт нашего существования – не говоря уже о колоссальной проблеме выявления всех тонкостей и

аспектов того, как связаны с величинами различных мировых констант космологические и биохимические условия, необходимые для нашего (и других наблюдателей) бытия, – становится важным моментом в интерпретации любых предсказаний и прогнозов в отношении величин физических постоянных. Нам нужно знать, при каких именно значениях констант возникают условия для существования наблюдателей. Вот тут-то и возникает проблема, поскольку многие (если не все) из констант будут связаны друг с другом через всю структуру какой-либо "теории всего". Поэтому нам нужна полная теория, прежде чем мы сможем до конца оценить условные вероятности эволюции сложных наблюдателей, каковыми являемся мы. Сегодня определение физических констант кажется гораздо более трудным испытанием для потенциальных "теорий всего", чем это выглядело тогда, когда поиск, концепций только начинался.

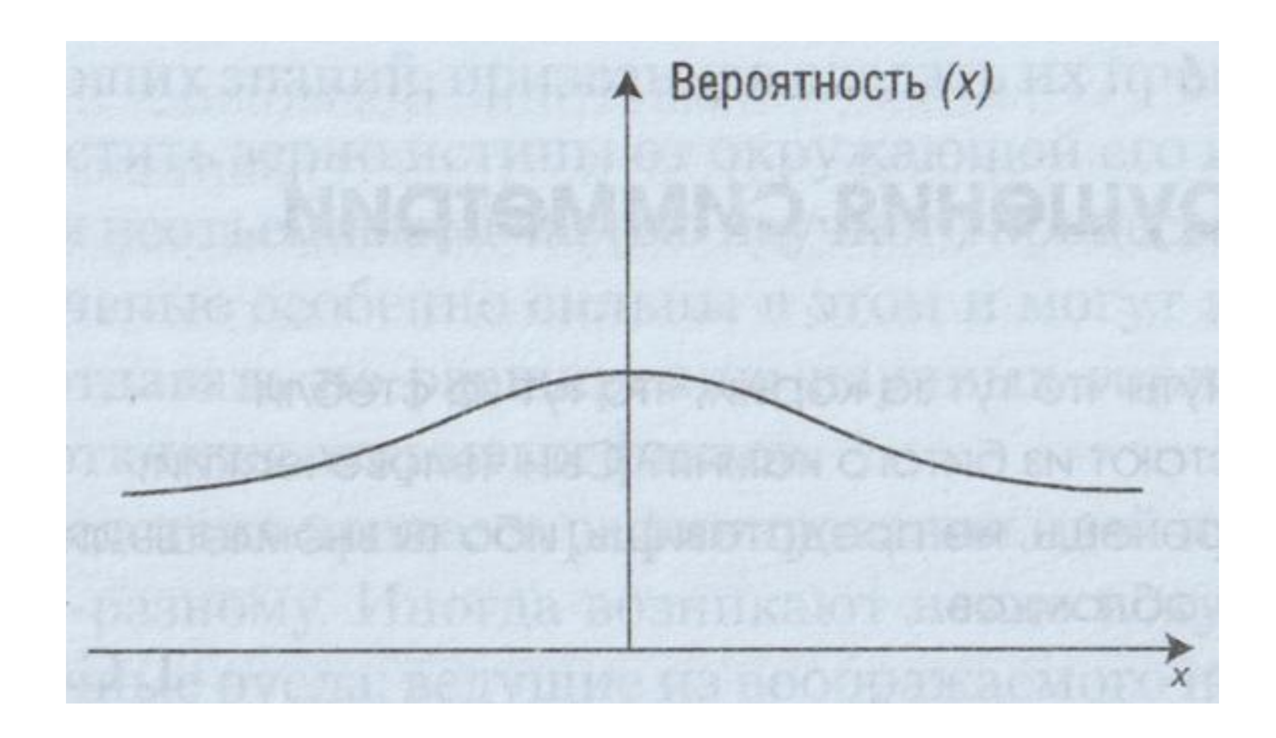


Рисунок 5.3. Распределение вероятностей, характерное тем, что ни одна из величин не является гораздо более предпочтительной по сравнению с другими. Если "теория всего" предсказывает, что функция распределения вероятностей величины физической константы x в нашей видимой Вселенной должна выглядеть так, тогда трудно сделать вывод о том, следует ли принять за соответствующую реальность наиболее вероятную величину (в данном случае ноль). Если мы знаем диапазон возможных величин x, соответствующих вселенным, в которых невозможны эволюция и само существование разумных существ, эти величины можно не рассматривать. Мы должны сравнивать наблюдения с вероятностью того, что константа принимает значение x, при том условии, что данная величина допускает эволюцию жизни и может сильно отличаться от наиболее вероятного значения x без наложения условий.

Глава 6

НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ

Стиснуты что тут за корни, что тут за стебли
Взрастают из битого камня? Сын человеческий,
Не изречешь, не представишь, ибо ты внемлешь лишь
Груде обломков...

Т. С. Элиот*

Бесконечная история

Поиск "теории всего" – это поиск универсальной тривиализации – универсального "ничего кроме".

Жан-Карло Рота

Работа ученого – не только открывать новые факты об окружающем мире и предлагать новые теории. Многие книги и статьи отражают третью грань их деятельности: обработку, оттачивание существующих идей, придание им более простой, интуитивно более понятной формы, превращение сложного в тривиальное.

Впервые высказанная некая глубокая идея зачастую излагается неуклюжим и громоздким языком, который к ней еще не приспособлен, потому что ранее служил для выражения совсем других тезисов. Постепенно ученые анализируют новшество и находят более четкие, лаконичные формулировки, позволяющие соотнести его с уже существующими

* Перевод С. Степанова.

положениями. Подобное может быть простым логическим переходом от старого к новому; если же наметятся столкновения противоположностей, тогда придется делать радикальный выбор между непримиримыми альтернативами. Эта дистилляция существующих знаний, призванная сделать их проще и яснее, очистить зерно истины от окружающей его шелухи, является неотъемлемой частью научного процесса. Некоторые ученые особенно сильны в этом и могут все свое время отдавать не расширению научных горизонтов, а обработке уже открытых фактов.

Последствия процесса рафинирования идей проявляются по-разному. Иногда возникают некие искусственные научные русла, ведущие из воображаемого невежества прошлого в просветленное и правильное настоящее. Сглаживаются острые углы и придумываются мотивы. Начинается поиск единомышленников. Делается все это с самыми лучшими намерениями. Мол, логический подход к изучению научных проблем эффективнее исторического. Тот факт, что ученые прошлого зашли в тупик, – не причина отправлять следом за ними новые поколения исследователей, не предложив им более удобные пути. Нет никаких сомнений, что благодаря историческому процессу дистилляции идей физические законы выглядят сегодня более простыми, неопровержимыми и неизбежными.

В последние десятилетия открытие мировой симметрии, обещающей стать ключом к потайной двери фундаментальных структур природы, было главным двигателем этого не имеющего конца поиска все более элементарной картины сущего. Вожделенная "теория всего" обещает сделать последнее открытие, после чего вся физика сосредоточится на рафинировании собственного содержания, упрощении уже существующих объяснений. Поначалу "теорию всего" будут способны понять только избранные, позже – более широкий круг физиков-теоретиков. Потом ее сумеют изложить так, что она станет доступной ученым других специализаций, студентам и, наконец, интересующейся публике. Придет время, когда ее формулы начнут печатать на майках. И на всех стадиях процесса будут считать, что путь от сложного к очевидному – это и есть путь к "истинной" картине мира*.

* Этот процесс как ничто другое роднит математику и физику. Многие тома математической литературы посвящены дистилляции известных результатов, благодаря чему заумное становится очевидным или тривиальным в том смысле, что это лишь другое проявление хорошо известных принципов. Наиболее яркий пример такого рода – теорема о распределении простых чисел. Она ведет свое начало из гипотезы, выдвинутой в конце XVIII века Лежандром и Гауссом. Суть проблемы – определить приблизительную долю простых чисел (*продолжение на следующей странице*)

Несмотря на страсть к упрощению, мы прекрасно понимаем, что, какими бы несложными, симметричными и элегантными ни называли законы природы физики-теоретики, реальный мир не таков. Он замысловатый и запутанный. Большинство наблюдаемых нами объектов и явлений несимметричны и отнюдь не ведут себя в согласии с какими-либо простыми законами. Окружающий нас мир почему-то отказывается повиноваться вечным и непреложным законам природы, которые управляют элементарными частицами и физическими взаимодействиями. Дело в том, что мы не видим сами законы, только их эффекты. В математических уравнениях они находят отображение. Это и есть секрет, примиряющий сложность, наблюдаемую в природе с рекламируемой ее простотой. Результаты оказываются сложнее законов; решения сложнее уравнений. Даже если какой-то закон природы обладает определенной симметрией, это вовсе не значит, что все его последствия будут нести на себе ее следы. Тот факт, что сердце у нас расположено слева, нельзя воспринимать как свидетельство левизны законов природы.

Разницу между законами и результатами, уравнениями и решениями приходится наблюдать и в другом контексте: во взаимоотношениях между классической и квантовой механикой. После изобретения современных формальных методов последней мы научились "квантовать" различные проблемы классической физики, экстраполируя наши знания макромира в микромир, где сам факт наблюдения накладывает отпечаток на изучаемый объект. Но эта процедура позволяет лишь генерировать квантовые уравнения (или законы) из уравнений и законов классической физики. Методов генерирования квантовых решений из классических не существует. Их даже не может быть, потому что в квантовой механике есть решения (например, описывающие процессы квантового туннелирования), аналогов которым в классической нет в принципе.

* *(продолжение с предыдущей страницы)* (то есть тех, которые делятся только на себя и 1) в любом числовом множестве. Впервые эту теорему доказали в 1896 году Жак Адамар и Шарль ла Валле Пуссен. Теорема утверждает, что доля простых чисел в множестве, содержащем первые n натуральных чисел, где n достаточно велико, приблизительно равно величине, обратной к натуральному логарифму n. Первые доказательства были очень сложными, поскольку опирались на комплексный анализ (ветвь математики, достаточно далекую от теории чисел). Затем Эдмунд Ландау и Норберт Винер предложили более прозрачные доказательства с использованием понятий попроще. И только через более полувека после первоначального доказательства, в 1948 году, Эрдеш и Сельберг предложили, можно сказать, элементарное доказательство, используя стандартные идеи, имеющие непосредственное отношение к теории чисел (впрочем, не поймите превратно: доказательство было не то чтобы простым и коротким – более 50 страниц). Еще почти 20 лет спустя, вначале 1960-х годов, это доказательство вновь подвергалось переработке Норманом Левинсоном, которому удалось еще более упростить его. Такова эволюция математики – и это скорее правило, чем исключение. Единичными случаями приходится признать такие воистину оригинальные идеи, как диагональная аргументация Кантора или гёделевское доказательство неразрешимости. Подобные идеи рождаются лишь несколько раз за столетие.

Нарушения симметрии

Как и горнолыжный курорт, полный девушек, гоняющихся за мужьями, и мужей, гоняющихся за девушками, рассматриваемая ситуация не столь симметрична, как может показаться.

Алан Маккей

Нарушениями симметрии принято называть ситуации, в которых результат действия закона нарушает его симметрию. Примеры встречались на протяжении тысячелетий, но никогда не были по достоинству оценены. А именно ими объясняются огромное многообразие и сложность реального мира.

У Аристотеля и его комментаторов мы обнаруживаем классическую проблему: голодная тварь, помещенная строго посредине между двумя порциями еды. Самой известной версией этой проблемы, призванной подчеркнуть идею о том, что любой выбор должен иметь под собой достаточную причину, стал буриданов осел. Лейбниц оспаривал этот парадокс, утверждая, что два варианта никогда не бывают идентичными. Дескать, всегда есть некий дисбаланс, побуждающий предпочесть один вариант другому. В современной физике этот вопрос возникает во многих ситуациях, где базовая симметрия делает всевозможные различные исходы равновероятными. На практике результат получается какой-то один, и уже это является нарушением изначальной симметрии. Например, если поставить вертикально длинный шест, он обязательно упадет в какую-нибудь сторону. Но это не значит, что законы природы отдают предпочтение какому-то одному направлению перед другими. Более замысловатый пример связан с магнитами. Если стержневой магнит нагреть до определенной температуры, теплового возбуждения атомов оказывается достаточно, чтобы нарушить ранее существовавшую магнитную упорядоченность. В горячем состоянии стержень полностью утрачивает магнитные свойства. Но когда температура падает, разупорядочивающая энергия теплового движения снижается, и с энергетической точки зрения наиболее благоприятным оказывается одно из двух абсолютно симметричных состояний, показанных на рисунке 6.1. Эти состояния характеризуются упорядочиванием молекул металлического стержня в одну или другую сторону. В первом случае мы получаем стержневой магнит, где северный и южный полюсы соответствуют

надписям, а во втором полюсы меняются на противоположные. Конечный результат всегда асимметричен. Он имеет строго определенную ориентацию. Изначальная симметрия спрятана на заднем плане, потому априори обе ориентации, как север – юг, так и юг – север, являются равновероятными.

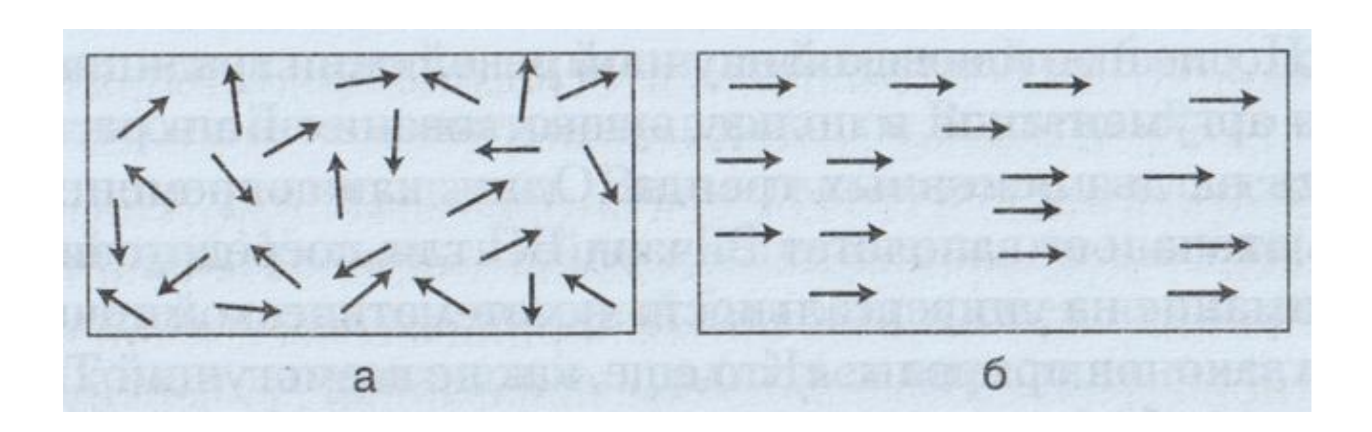


Рисунок 6.1. Намагничивание, (а) – когда температура превышает критическое значение, силы, воздействующие на атомы в металлическом стержне, не имеют какого-либо предпочтительного направления, они распределены симметрично, потому что сильное тепловое возбуждение рандомизирует какую-либо упорядоченность; (б) – когда температура опускается ниже критического уровня, для атомов энергетически экономичнее выстроиться в одном направлении; оно выбирается случайным образом, но когда выбор сделан, симметрия направлений, присущая ситуации (а), нарушается, и на стержне устанавливаются магнитные полюсы.

Эти примеры объясняют, почему наука – дело столь сложное. Мы наблюдаем нарушения симметрии во многих частностях мирового порядка и должны выводить из них скрытую симметрию, характеризующую физические законы.

Элегантный и гармоничный гобелен природы существует, но мы видим его с изнанки. Глядя на невпопад торчащие обрывки ниток, мы должны воссоздать прекрасные узоры, скрытые за ними.

Натуртеология: сказка о двух сказках

Порой истина врывается в историю на спине заблуждений.

Райнхольд Нибур

Прежде чем мы углубимся в разбор дихотомии между законами и результатами их действия, было бы познавательно вкратце рассмотреть историю теологии природы.

После ньютоновской научной революции традиционная аргументация в пользу существования Бога распалась на два основных тренда. Одни, как современник Ньютона и его апологет Ричард Бентли, сосредоточили внимание на универсальности и математической точности законов природы: "Кто еще, как не всемогущий Творец, мог быть автором таких законов?" Подобная форма аргумента больше всего импонировала физикам и астрономам, поскольку деятельность именно этих ученых имела самую прямую связь с девственно-чистой симметрией и гармонией, образцами которых служили физические законы. Вышеназванный аргумент логически прост, но его трудно оценить по достоинству, не обладая специальными знаниями. Следовательно, людям непосвященным принять его было сложно. Поэтому параллельно существовала другая форма телеологического аргумента, черпавшая силы из замечательных примеров устроенности и гармонии, непосредственно наблюдаемых в мире природы, – посмотрите, например, как хорошо приспособлены растения и животные к среде, в которой они обитают: разве это могло произойти случайно, само собой? Такая аргументация, несмотря на логическую уязвимость, весьма наглядна, и ее легко понять и принять. Она казалась более убедительной и неспециалистам. Данной точки зрения придерживались натуралисты и вообще люди, хорошо знакомые с подробностями жизни флоры и фауны. Этот аргумент фокусируется на внешних проявлениях законов природы – то есть на нарушениях симметрии, – а не на самих законах. Приверженцы подобной аргументации выбирают из природы бесчисленные частности и указывают на их корреляции с другими частностями, которые на поверхности выглядят совершенно независимыми, но при этом так гармонично соответствуют друг другу, что здесь явно просматривается рука Провидения.

Когда Дарвин предложил свою теорию естественного отбора, содержавшую простое и общее объяснение всех этих "совпадений", никаких последствий не было, потому что на неизменяемые инварианты Вселенной его концепция не покушалась. Внимательно изучив классический труд Уильяма Пейли "Естественная теология", мы увидим, что автор, который был одновременно и математиком, и натуралистом, предлагает вниманию читателя обе версии телеологического аргумента. Он приводит многочисленные примеры замечательной устроенности в мире природы, будь то устройство человеческого глаза, привлекательность цветков для пчел, маскировочная расцветка животных, но одновременно подчеркивает тот факт, что закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, обладает множеством особых свойств, которые являются необходимыми предпосылками существования и устойчивости Солнечной системы, а значит, и нашего бытия. Однако если почитать критиков Пейли, становится очевидным, что они воспринимают "Естественную теологию" только как попытку биологической адаптации старой и наивной версии телеологического аргумента. Вторая часть его аргументации, связанная со свойствами ньютоновских законов движения и гравитации, вообще не упоминается. Интересно, что сам Пейли отдавал предпочтение примерам из биологии как более наглядным, а свои же астрономические аргументы принижал, потому что они не позволяли воспользоваться любимым риторическим оружием – аналогией. Знания, опыт и интересы Пейли примерно поровну разделялись между этими двумя направлениями. Прежде чем стать священнослужителем, он изучал математику, но при этом был страстным натуралистом-любителем.

У телеологического аргумента есть еще одна примечательная грань, которая обеспечивала связь между названными выше двумя формами, доминировавшими в умах и трудах натуртеологов на протяжении XVII-XVIII веков. В то время существовало твердое убеждение, что некое всемогущее божество управляет явлениями, которые внешне выглядят случайными из-за того, что невозможно выявить определенную причину данных событий. Этот контроль проявляется в поддержании устойчивого среднего уровня значений важных физических параметров. Подобная точка зрения представляет особый интерес, потому что переплетается с ранними робкими попытками создания теории вероятностей и статистики. Ньютон, как уже было сказано, горячо отстаивал телеологический аргумент, основанный на точности и универсальности открытых им законов движения и гравитации. Но он также был впечатлен странным устройством Солнечной системы, которое его

законами никак не объяснялось. Чтобы последняя стала такой, какая она есть, требовалось определенное сочетание начальных условий и случайности, которая на практике сводится к некоему набору хаотично нарушающих симметрию процессов. В своей "Оптике" (1704) он спрашивает:

> "Как так получилось, что планеты движутся все одинаково по концентрическим орбитам, тогда как кометы движутся вразнобой по самым эксцентрическим орбитам... Слепой рок не сделал бы так, что все планеты движутся одинаково по концентрическим орбитам, если не считать некоторых незначительных отклонений, которые могут быть вызваны взаимным воздействием комет и планет друг на друга и которые будут постепенно возрастать, пока системе не потребуется радикальная трансформация. Такая удивительная однородность планетной системы могла возникнуть лишь вследствие изначального сознательного выбора. То же самое относится и к однородности тел животных".

Уильям Дерхам, автор двух исключительно успешных трудов по натуртеологии, "Физико-теология" (1713) и "Астро-теология" (1715), в июле 1733-го писал Джону Кондуиту про

> "необычное доказательство Бога, о котором сэр Исаак [Ньютон] упомянул во время одной из наших бесед вскоре после публикации “Астро-теологии”. Он сказал, что в законах движения небесных тел есть 3 прямых свидетельства всемогущества и всевышней мудрости. 1. То, что движение, приданное телам, является боковым, то есть направлено перпендикулярно по отношению к радиусам, а не вдоль них или параллельно им. 2. То, что движения у них у всех примерно одинаковы. 3. То, что их орбиты имеют одинаковый наклон".

Признание Ньютоном исключительно необычного состояния Солнечной системы оказало сильнейшее влияние на позднейшие математические исследования вероятности случайного возникновения ее структуры, предпринятые Лапласом и Бернулли, и на развитие теории вероятностей вообще. Абрахам де Муавр посвятил Ньютону свою "Теорию случайностей", заявленной целью которой было создать

> "метод расчета эффектов случайности... и тем самым установить определенные правила, позволяющие оценить, в какой мере те или иные события объясняются замыслом [то есть определенными причинами], а в какой – случайностью... дабы разжечь в других желание... научиться из вашей [Ньютона] философии собирать,

методом простого расчета, свидетельства великой мудрости и замысла, наблюдаемых в природных феноменах по всей Вселенной".

Лаплас, разумеется, прославился тем, что с помощью тех же ньютоновских законов движения и гравитации объяснил все известные движения в Солнечной системе и тем самым избавился от необходимости присутствия божественной силы, которая, как предполагал Ньютон, время от времени вмешивается в процесс, чтобы корректировать возникающие нарушения. Так, долговременная устойчивость усредненной структуры Солнечной системы получила объяснение через свойства законов гравитации и движения, хотя сама структура оставалась необъясненной в отсутствие сколько-нибудь детальной концепции формирования Солнечной системы. Позже схожие научные разработки повлияли на интерпретацию многих специфических свидетельств предполагаемого наличия "замысла" в физическом мире. Например, дарвиновская теория эволюции через естественный отбор на практике является системой статистической, поскольку мы не в состоянии отследить все причинно-следственные связи в историческом процессе. Поэтому однородность структуры конкретного вида животных рассматривалась как последствие устойчивого характера средних значений такого развития, а не как последствие некоего особого выбора начальных состояний. В 1901 году в первом номере журнала "Биометрика", посвященного статистическим исследованиям биологических проблем, была размещена редакционная статья, объяснявшая причины основания журнала. В публикации говорилось, какие глубокие различия во взглядах существовали между физиками Викторианской эпохи, изучавшими законы природы и их последствия, и биологами, которым приходилось сталкиваться с многообразным миром случайных событий:

> "Вопрос эволюции – это проблема статистическая... Чтобы правильно интерпретировать наши наблюдения, мы должны обратиться к математике больших чисел, к системе массовых феноменов... Характерный образ мышления, присущий Ч. Дарвину, позволил ему вывести эволюционную теорию без использования математических концепций; без математики обходился и Фарадей, открывший явления электромагнетизма. Но как каждая идея последнего может быть описана математически и требует математического анализа... так же и идеи Дарвина – вариации, естественный отбор... – похоже, наконец- то нашли для себя математическое определение и потребовали математического анализа".

Изъяны природы

Невозможно свести все законы к одному... как нет априорных средств лишить мир его уникальности.

Джозайя Ройс

От "теории всего" нельзя ждать ответов на все вопросы. Она может рассказать обо всех законах природы, но одно это не позволит нам объяснить или вывести все, что мы наблюдаем во Вселенной, через фундаментальные принципы концепции. Попробуем вникнуть в суть данного утверждения более детально.

В приведенных выше примерах нарушения симметрии существует некое идеальное состояние, которое рушится вследствие того, что какая-то микроскопическая флуктуация перевешивает чашу весов в ту или другую сторону. Если она ведет происхождение из квантовой механики, для нее нельзя отследить определенную локальную причину, а значит, она случайна по существу, по-настоящему, а не просто в том смысле, что причина есть, но мы ее точно не знаем. Таким образом, нарушение симметрии можно отнести на счет случайных процессов на квантовом уровне. Если нам дадут стержневой магнит и попросят объяснить его структуру и поведение с позиции законов природы, описанных некой "теорией всего", интуитивные представления о порядке вещей подскажут нам, что в природных феноменах есть аспекты, на объяснение которых посредством "теории всего" нечего и надеяться. В частности, мы даже не будем пытаться объяснить, почему северный полюс именно на этом конце стержня, а не на другом, или магнит именно такой длины. Точно так же и в практической физике приходится иметь дело с аспектами феноменов, которые являются почти случайными вследствие спонтанного нарушения какой-то симметрии. Исследуя Солнечную систему, мы не пытаемся объяснить, почему в ней именно столько планет. Это слишком конкретный вопрос для теории их формирования, в которой какие-то аспекты оказываются такими, а не другими просто в силу определенных начальных условий или случайных флуктуаций. В ситуации с Солнечной системой несложно выделить частности,

и мы не станем даже пытаться объяснять их с позиции одних только законов природы. Но когда мы имеем дело с проблемами крупномасштабной структуры Вселенной, разграничительную линию провести гораздо труднее. Более того, при нашем нынешнем уровне знаний это невозможно.

Феномен нарушения симметрии вводит в эволюцию Вселенной элемент истинной случайности. Некоторые качества ее, например, баланс между веществом и антивеществом, могут в разных местах определяться особым образом, в зависимости от обстоятельств. В лабораторных условиях обычно ясно, какие аспекты можно отнести на счет случайных нарушений симметрии, чтобы не пытаться искать им объяснение в фундаментальных законах природы. Эта ситуация характерна для изучения конденсированных форм материи "промежуточного" мира, не относящейся ни к субатомным, ни к астрономическим масштабам. Если говорить о космологии, то мы пока еще не знаем, какие аспекты структуры Вселенной следует отнести к законам природы, а какие – к случайным побочным эффектам их действия, когда происходит нарушение изначальной симметрии. Разделение здесь очень важно, потому что если некая характеристика Вселенной является прямым следствием законов или даже начальных условий, тогда ее нужно рассматривать как необходимую и неотъемлемую, которая просто не могла быть другой. Если же она является следствием нарушения симметрии, значит, она могла бы быть иной, и ее не стоит воспринимать как ключевой индикатор структуры Вселенной. Мы не знаем, к примеру, являются размеры гигантских скоплений галактик неизбежным следствием законов природы и начальных условий после Большого взрыва или результатом случайных нарушений симметрии на ранних стадиях существования Вселенной.

Таким образом, располагая информацией о законах природы, начальных условиях, физических взаимодействиях, частицах и константах, но не умея различать симметрии законов и начальных условий, спрятанные за иерархией нарушений симметрии, произошедших за время существования Вселенной, мы приходим к выводу, что наши знания далеко не полны.

Хаос

И произошла на небе война.

Откровение Иоанна Богослова

Существует форма по-настоящему масштабного нарушения симметрии, вызывающая большой интерес у ученых. Она известна как хаос. Хаотическими называют феномены, эволюция которых чрезвычайно чувствительна к начальному состоянию. Малейшие сдвиги приводят к огромным изменениям в будущем. Этим свойством обладает большинство сложных и беспорядочных явлений, таких как турбулентность или погода. Во второй половине XIX века первым на значение этого фактора обратил внимание Джеймс Клерк Максвелл. Когда его попросили провести в Кембридже научную конференцию, посвященную проблеме свободы воли, он обратил внимание коллег на системы, в которых малейшая неопределенность текущего состояния не позволяет точно предсказать будущие. Польза от детерминистических уравнений есть только в том случае, если начальное состояние известно с абсолютной точностью (чего быть не может). Пренебрежение системами, которые в природе являются скорее правилом, чем исключением, тихой сапой позволило закрепиться идее детерминизма в натурфилософии. Традиционная увлеченность только простыми, устойчивыми и нечувствительными к начальным условиям феноменами породила чрезмерную веру во всеобъемлющее влияние законов природы. По мнению Максвелла,

> "много света можно было бы пролить на эти проблемы, вплотную занявшись вопросами устойчивости и неустойчивости. Когда положение вещей таково, что бесконечно малая вариация текущего состояния приводит к бесконечно малым изменениям состояния в будущем, такую систему – пребывает ли она в покое или в движении – называют устойчивой; но, когда бесконечно малая вариация текущего состояния приводит к финитным изменениям состояния системы в финитном будущем, тогда состояние системы называют неустойчивым.
>
> Ясно, что существование неустойчивых состояний делает невозможным предсказание будущих событий, если наши знания в отношении текущего состояния являются не точными, а лишь

приблизительными. Против метафизической доктрины, что одни и те же причины влекут за собой одни и те же последствия, никто не возразит. Но в реальном мире пользы от нее немного, потому что причины никогда в точности не повторяются, а значит, не повторяются и следствия... В физике есть схожая аксиома, которая гласит: “Из похожих причин вытекают похожие следствия”. Но здесь мы делаем переход от тождественности к похожести, от абсолютной точности к более или менее грубому приближению. Как я уже сказал, есть определенные классы феноменов, где маленькая ошибка в исходных данных приводит к маленькой ошибке в результате... В этих случаях речь идет об устойчивом развитии.

Но есть другие классы феноменов, более сложных, где может иметь место неустойчивость..."

Максвелл стал первым из выдающихся физиков посленьютоновской эры, сосредоточившим внимание не на формах законов природы, а на последствиях их действия. Успех Ньютона был построен на открытии простых всеобщих законов, которые придали смысл широкому ряду самых разных земных и небесных явлений. Влияние ученого на последующее развитие науки, особенно в Великобритании, было так велико, что, в отличие от примитивных обществ, которые все внимание уделяли частным явлениям природы, физики-ньютонисты интересовались только теми ее аспектами, которые подчинялись открытым законам. Ньютонизм был не просто научным методом; это был образ мышления, выходивший далеко за пределы естествознания.

В ретроспективе кажется даже странным, что так много времени потребовалось, чтобы осознать исключительную чувствительность многих явлений к их исходному состоянию. Ведь существуют многие области жизни, где эффект причины диспропорционален и очевиден. Интересные замечания по этому поводу можно обнаружить в медицинских трактатах Галена, относящихся ко II веку н. э., где автор пишет о последствиях случайности в процессе лечения:

"У здоровых людей... организм не меняется даже под действием крайних причин; но у стариков даже малейшие из них приводят к большим переменам".

Более того, Гален верил, что здоровье является равновесным состоянием между двумя крайностями, где "точное среднее всех

крайностей" одинаково "во всех частях тела". Поэтому он считает, что любые случайные отклонения от равновесия под действием внешних факторов должны быть очень маленькими:

> "Здоровье – это своего рода гармония... Всякая гармония достигается и проявляется двояко: во-первых, через приближение к совершенству... а во-вторых, за счет лишь очень небольших отклонений от этого абсолютного совершенства".

Хаотические явления исследуют по методике, которая существенно отличается от той, что используется в традиционных физико-математических приложениях. В прошлом такие сложные физические феномены, как турбулентность в жидкости, пытались моделировать при помощи уравнений, как можно более точно описывающих наблюдаемые движения. Если используемое нами уравнение содержит хотя бы малейшую неточность или упущение, поведение модели будет резко отличаться от того, что происходит в реальном мире. Вследствие этой чувствительности ученые стали проявлять все больше интереса к выяснению общих характеристик практически всех возможных уравнений.

Строго говоря, все возможные уравнения не могут иметь каких-либо общих свойств, потому что любое из последних, которое вам вздумается внести в список, будет реализовано каким-нибудь уравнением. Однако если ограничить ожидания только свойствами почти всех уравнений, то есть исключить из рассмотрения лишь некоторые особые случаи, крайне нереалистичные и невероятные, тогда оставшиеся уравнения действительно могут обладать общими свойствами. Их обнаружение стало одним из самых поразительных достижений современной математики.

Исследования уравнений в целом, а не в частности показали, что хаотическое поведение является скорее правилом, чем исключением. Мы привыкли думать, что линейные, предсказуемые, простые явления превалируют в природе, поскольку именно такие явления предпочитали изучать, игнорируя все прочие. По существу, именно поэтому мир доступен нашему познанию. Простые линейные феномены можно анализировать по частям. Целое не больше суммы частей. Так мы можем понять хоть что-то, даже если не в состоянии постичь всего. Нелинейные хаотические системы – дело другое. Их нужно понимать целиком, чтобы уяснить составляющие их части, потому что целое гораздо больше суммы частей. Об этом мы подробнее поговорим в главе 9.

Некоторые модели, предлагаемые в рамках теории гравитации Эйнштейна в качестве возможных описаний самых первых мгновений расширения Вселенной, демонстрируют хаотическую чувствительность к начальным условиям. Если Вселенная, как мы обсуждали в предыдущей главе в контексте суперструнных картин ранней эволюции, претерпевает переход, в процессе которого некоторые измерения пространства сворачиваются, тогда число последних, избегнувших этой судьбы, может хаотически-чувствительно зависеть от условий самых первых моментов рождения мира. По меньшей мере, есть основания ожидать, что в разных местах это число могло быть разным. Ответ на вопрос, какую часть Вселенной мы в состоянии вывести из физических или логических принципов, может, таким образом, зависеть от того, насколько велика была чувствительность рождавшегося мира к начальным условиям существования.

Случайность

Статистика – это физика чисел.

Перси Дьяконис

Современная наука, изучающая хаотические процессы, считает их характерными для большинства типов преобразований. Нечувствительность к начальным условиям переходит из разряда исключений в правила только тогда, когда на систему накладываются весьма конкретные ограничения. Большинство общих типов гладких преобразований зачастую демонстрируют тонкую чувствительность к начальным условиям, что приводит к очень сложному поведению наблюдаемых феноменов. Бурная река может начинаться с достаточно тихого ручья, все части которого двигаются с похожей скоростью и в аналогичном направлении. Однако после того, как река преодолеет пороги или обрушится водопадом, мельчайшие различия в движении ее соседних участков многократно усугубляются. Пока понятие хаоса не устоялось как следует, ученые подходили к изучению порождаемых им сложных процессов преимущественно как к проблеме статистической, рассматривая происходящее как "случайность" – во всех практических смыслах.

Любопытный исторический факт: такие процветающие ныне научные дисциплины, как теория вероятностей и статистика, до середины XVII века не существовали вовсе. Это тем более удивительно, что в математику данные дисциплины проникли под влиянием азартных игр, которыми люди увлекались на протяжении тысячелетий. Само слово "азарт" происходит от арабского альзар, что значит "игральные кости". Они были популярным времяпрепровождением в Древнем Египте, Греции, Риме и на всем Ближнем Востоке. Почему теория вероятностей – исчисление случайных событий – так и не развилась в этих странах и культурах, в отличие от геометрии, арифметики и алгебры? К сожалению, удовлетворительного ответа на этот простой вопрос нет. Люди знали о непредсказуемых событиях, называемых "случайными", и четко отделяли их от ожидаемых. Но эти непредвиденные ситуации не изучались в рамках естественных наук или математики. Они не считались объектом научного познания.

В некоторых обществах такое отношение к случайным событиям было тесно связано с религией. Зачастую сопряженное с ними (например, метание жребия) трактовалось как метод непосредственного общения с Богом (или богами). Можно вспомнить из Библии, как после метания жребия моряки выбросили за борт пророка Иону или как одиннадцать апостолов таким же образом выбрали Матфея на место Иуды Искариота. Там же, в Библии, можно найти ссылки на разные способы гадания – например, когда подбрасывали палку и в зависимости от того, как она упадет, выбирали один из возможных вариантов ответа на интересующий вопрос. В нескольких местах Ветхого Завета упоминаются загадочные предметы "урим" и "туммим", которые хранили в своем облачении (ефоде) первосвященники. К ним прибегали по разным поводам, когда нужно было получить ответ "да" или "нет". Возможно, урим и туммим были разновидностью жребия, и их то ли бросали, то ли священник просто вытаскивал их из кармана. Существует более убедительная версия, что это были два плоских предмета, одна сторона каждого из которых была "урим" (от еврейского слова "арар", означающего "проклинать"), а другая – "туммим" (от "тамам", что значит "быть совершенным"). Таким образом, двойной туммим означал "да", а двойной урим – "нет", а сочетание урима и туммима – отсутствие определенного ответа. Во всех этих примерах, а таких много, упор делается на использование процессов, которые человеку не дано предугадать и которые от имени Бога открывают людям неизвестную, но вполне определенную причину наблюдаемых событий. То, что Иона по жребию выбран "виновником" бури, подразумевает, что ничего случайного на свете

нет, не существует некоего таинственного процесса под названием "случай", который действует в отрыве от заведенного порядка вещей. Моряки ищут, кто виноват, и пытаются узнать то, что в этом контексте известно только Богу, потому что речь идет о достаточно серьезном проступке, если в наказание послана буря. Во многих местах Ветхого Завета использование жребия и других форм гадания в основном преследовало цель избавить процесс принятия решения от человеческой предвзятости. Ближе всего к признанию понятия "случайных" событий, не направляемых Богом, Библия подходит в истории Гедеона, когда тот выкладывал шерсть на землю. Он сделал это дважды. В первый раз он хотел, чтобы роса была только на шерсти, а на земле было сухо, а во вторую ночь наоборот. Можно предположить, что второе испытание ему потребовалось, чтобы исключить возможность того, что в первую ночь ожидавшееся событие произошло случайно, а изменение, привнесенное во второе испытание, было призвано исключить то, что мы назвали бы сегодня систематической ошибкой.

Данные примеры наводят на мысль, что манипуляции со жребием и гаданиями были не просто баловством ради забавы, но имели под собой теологический базис. Кроме того, результаты гаданий ни в коем случае не истолковывались как случайные или даже естественные. Это были ответы, полученные от Бога. Многие комментаторы считают ветхозаветные истории древнейшими иллюстрациями хорошего знакомства тех людей с современным нам понятием случайности. На самом же деле ничего подобного и близко не было.

В других древних культурах случайность зачастую ассоциировалась с хаосом и тьмой. Подобные события были нежелательными аспектами темной стороны мира, из которой видимая часть Вселенной смогла ускользнуть только благодаря героическим усилиям богов. Случайные природные явления и катаклизмы позволяют нам мельком увидеть изнанку вещей. Непредвиденность в рамках этой философии является чем-то нежелательным, поскольку тесно связана с неопределенностью и непредсказуемостью, а значит, с опасностью. Если что-то идет не так, как ожидалось, – случился неурожай или нет дождя – это, как правило, имеет очень серьезные последствия, легко отождествляемые с божьим наказанием.

Исторические представления помогают понять, почему случай не стал предметом научного исследования. Он не от мира сего. Разумеется, всегда будут события, которые, в силу нашего невежества, поначалу выглядят

беспорядочными, но позже их систематизируют, когда кто-нибудь обнаружит в них предсказуемый аспект. Более того, это послужит зеркалом всей истории научного прогресса человечества. Поначалу все кажется случайным, мистическим, отражением капризной воли богов. Но по мере выявления определенного порядка, присущего вещам и явлениям, развиваются представления о пантеоне. Одни боги отвечают за новообретенную гармонию, а другие по-прежнему остаются на стороне темных сил и используются как объяснение всяческих нарушений порядка. Время идет, многое становится понятным. Упорядоченность явлений настолько благотворно влияет для людей, что их внимание приковано почти исключительно к ним, а идея случайности вместе с событиями, не имеющими ясных причин, просто отдвигаются в сторону.

Несмотря на религиозные и социальные табу на изучение вещей, происходящих "случайно", во многих обществах спектр взглядов достаточно широк и всегда находятся не слишком благочестивые граждане, которые не прочь поразмышлять над тем, как бы это повысить шансы на выигрыш в азартных играх*. Многие из этих людей были богатыми и образованными. По идее, мотив к детальному изучению отдельных средств рандомизации (генераторов случайных событий) должен быть очень силен: ведь приобретенные знания могли бы обеспечить игроку ощутимое финансовое преимущество в долгосрочной перспективе. Другое дело, что такое исследование было делом хлопотным, если вспомнить, что игроки древности пользовались предметами типа костей или палочек, которые не обеспечивают равную вероятность случайных исходов. Более того, специальные научные изыскания здесь не нужны, поскольку довольно было и опыта. Наблюдая за результатами достаточно большого числа испытаний, можно выявить любые тенденции. Владелец таких игральных инструментов мог достаточно эффективно использовать эту "инсайдерскую" информацию против соперников. Таким образом, реальной нужды в общей теории средств рандомизации у людей, интересовавшихся азартными играми, не было. Более того, учитывая, что каждое средство отличается от других, легко предположить, что никакой общей теории вообще быть не может.

* Интересно поразмышлять над отношением общества ко многим формам азартных игр. Они рассматриваются как нежелательные, как зло, которого следует остерегаться. И одной только боязнью нежелательных финансовых последствий это объяснить нельзя, поскольку существуют и социально приемлемые формы азартных игр, к которым относятся с одобрением.

Однако, несмотря на отсутствие математической теории вероятностей в древние времена, сама концепция случайности людям была известна и вызывала оживленные дискуссии о том, как следует относиться к явлениям, не имеющим четко определенных причин. Мировоззрение стоиков, не явно проявлявшееся и в библейских взглядах, толковало случайность в духе антропоморфизма, за которым стояло лишь незнание определенных, но скрытых причин наблюдаемых явлений. Вот как излагал эту точку зрения в свете строго детерминистских взглядов стоиков Цицерон:

> "Не происходит ничего, что не должно произойти, и ничто не произойдет, если на то не будет причины... Если бы нашелся смертный, душа которого была бы способна различить цепочки связей, соединяющих каждую причину с каждой другой причиной, тогда ему не составило бы труда безошибочно предсказывать будущее. Ибо кто знает причины будущих событий, тот знает, какими события будут".

Этот фаталистический взгляд находит много откликов в истории, и самый яркий резонанс мы обнаруживаем в знаменитых пассажах Лапласа, где вводится понятие детерминизма и утверждается способность Всеведущего существа полностью предвидеть ход событий во Вселенной, управляемой законами Ньютона. Для такого высшего разума "нет ничего неопределенного".

Всеведущее существо, мелькающее в рассуждениях Лапласа о случайности, играет гораздо более важную роль и в другой ветви дискуссий. До середины XIX века важным компонентом натурфилософии была натуртеология. Как мы уже обсуждали выше, последняя развивалась по двум направлениям: рассматривала сами законы Ньютона и случайные результаты их действия. Исследование обоих аспектов привело к преобладанию точки зрения, что наша Вселенная является невероятной. Как и Ньютона, его апологетов интересовали нежелательные последствия, которые возникли бы, если бы законы природы были другими или хотя бы немного изменились. Все рассуждения неизбежно заканчивались следующим выводом: если исходить из предположения, что изначально все варианты были равновероятны, наша Вселенная является крайне невероятной, и потому существование именно таких законов и их последствий требует дополнительных объяснений. Чаще всего они сводились к тому, что из всех вариантов был выбран тот, в котором могла развиваться человеческая жизнь. Это неотъемлемая часть божественного замысла.

Непредсказуемость пола

Приведете к противоречию – любимый аргумент Бога.

Холбрук Джексон

В свое время умы многих натуртеологов сильно будоражил вопрос пола. Точнее сказать, один из аспектов: примерное равенство числа рождающихся мальчиков и девочек (при небольшом перевесе первых) в долгосрочной перспективе. Такой наивный поборник телеологического аргумента, как Уильям Дерхам, не считал этот небольшой перевес мальчиков каким-то долгосрочным математическим трендом, но, скорее, удивительным по своей хитроумности замыслом Провидения:

> "Перевес мальчиков очень полезен с точки зрения повышенной смертности мужчин по сравнению с женщинами в войнах, на море и т. д. То, что это промысел божественного Провидения, а не дело случая, вытекает из самих законов случайности".

Таким образом, автор апеллировал к телеологическому аргументу. Позднее появились конкурирующие статистические объяснения наблюдаемых фактов. Бернулли показал, что наблюдаемый небольшой перевес в пользу мальчиков возникнет, если вероятность рождения последнего составляет не 1/2, а 18/35.

Ни в одном из этих натуртеологических исследований концепция случайности не использовалась, поскольку воспринималась как антитеза божественному промыслу. Случайность символизирует собой все, что противостоит сложившимся христианским представлениям о сотворении материального мира и всевышнем руководстве его развитием. До Максвелла не нашлось человека, который взглянул бы на случайные процессы благосклонно – как на генераторы различных типов поведения*.

* Научные труды Максвелла включали в себя исследование поведения молекул в газах, где после большого числа столкновений возникает ситуация, не поддающаяся точному описанию. Каждое индивидуальное столкновение является хаотическим; однако, поскольку молекулы фактически не зависят друг от друга, возникает устойчивая статистическая картина их скоростей. Эти системы служат классическими примерами того, как хаос на микроуровне порождает устойчивый порядок на макроуровне. Чем больше молекул в системе, тем менее значительными будут случайные флуктуации от устойчивого среднего поведения.

Натуртеологи, изучавшие живую природу, пытались встроить в картину мира каждое конкретное явление, которое случилось или должно было произойти. Им не приходило в голову, что достаточно лишь наделить Вселенную логикой, согласно которой она сама реагировала бы на все происходящее. До этого додумался только Дарвин. За последнее столетие мы постепенно пришли к пониманию того важного обстоятельства, что случайные процессы обладают свойством отзывчивости. Они не требуют, чтобы живые системы имели изначально заданную программу, согласно которой они должны реагировать на каждое мыслимое событие. Нежизнеспособность систем, наделенных подобной программой, очевидна хотя бы в силу ее потенциальных размеров и внутренней сложности.

Эти аргументы натуртеологов насчет божественного промысла, обеспечивающего поддержание статистических средних величин в неком оптимальном равновесии, имели много сторонников. Не последней среди них была активистка движения сестер милосердия в Викторианскую эпоху Флоренс Найтингейл. Она оказалась так потрясена наблюдаемым устойчивым равновесием между числом рождающихся мальчиков и девочек, что одной из первых стала использовать данное обстоятельство как разновидность телеологического аргумента, доказывающего факт благожелательного вмешательства Провидения в природу. Это же побудило ее заняться углубленным изучением статистики, на предмет чего один из ее биографов писал:

> "Для нее статистика была больше чем наукой; она стала для нее формой религии. Кетле был для нее кумиром, она штудировала его “Социальную физику”, оставляя свои комментарии на каждой странице. Флоренс Найтингейл верила – и эта вера сквозила во всех ее поступках, -- что никакой руководитель не может быть успешным, если он не обладает статистическими знаниями... Она пошла дальше, утверждая, что Вселенная (включая человеческие сообщества) развивается в согласии с божественным планом и люди должны стремиться понять его и руководствоваться им в своих действиях. Но чтобы проникнуть в мысли Бога, говорила она, нужно изучать статистику, потому что она служит мерой Его целей. Таким образом, изучение статистики стало для нее религиозным долгом".

Эти подробные статистические исследования, проводившиеся в поддержку додарвиновских воззрений, интересны тем, что в них впервые проявилась некоторая вера в то, что развитие и изменчивость живой

природы подчиняются математическим законам. Они признали, что ответ на вопрос о долгосрочной однородности воспроизводства в корне своем имел статистический фактор. Разумеется, объяснение, предлагавшееся натуртеологами, не было научным, но оно, как и более широкие версии телеологического аргумента, сыграло важную роль в выявлении ключевых моментов, связанных с приспосабливаемостью и поддержанием равновесия в живой природе, что позволило Дарвину и его последователям сосредоточиться на поиске альтернативных объяснений.

Нарушения симметрии во вселенной

Здесь лежит Мартин Энглброг,
Упокой мою душу, Господь Бог,
Как сделал бы я, будь я Богом,
А ты – Мартином Энглброгом.

Надпись на могильном камне

В самом начале этой главы мы подчеркивали, что разница между законами природы и результатами их действия делает познание Вселенной вдвойне трудным. Согласно открытиям фундаментальной физики, структура материи в видимой части Вселенной является весьма чувствительной к температуре. Когда мы наблюдаем за элементарными частицами при все более высоких энергиях и температурах, то видим, что они становятся все более симметричными и, в каком-то смысле, более простыми. При очень высоких температурах, имевших место в первые мгновения Большого взрыва, Вселенная, возможно, была максимально симметричной. Но по мере процессов расширения и падения температуры для материи открывались новые возможности поведения, и симметрия то и дело нарушалась в разных направлениях.

Сегодня мы живем в холодном мире низких энергий, где стала возможной биохимия. Если бы в наших "краях" было значительно жарче или холоднее, жизнь, вероятно, здесь не зародилась бы. Таким образом, с точки зрения восстановления нарушенных симметрий Вселенной, мы находимся

не в лучшем положении. Мы живем в эпоху, когда глубинная симметрия Вселенной уже давно нарушилась, и истинная простота, скрывающаяся за наблюдаемым порядком вещей, стала недоступной нашему взору. Кроме того, многое из того, что мы видим во Вселенной сегодня, стало следствием случайных нарушений изначальной симметрии, а они могли быть совсем иными.

Конкретным примером этой проблемы является идея "инфляционной Вселенной". С ней мы познакомились в главе 3 и видели, что она занимает важное место в современной космологии. Инфляционная Вселенная является не столько новой космологической теорией, сколько дополнением к теории Большого взрыва, которая остается единственной приемлемой картиной общей эволюции Вселенной с тех пор, как в 1960-е годы была окончательно похоронена (как противоречащая наблюдениям) концепция устойчивой Вселенной. Стандартная модель Большого взрыва рисует Вселенную, которая в некий конечный момент времени в прошлом начала расширяться из некоего начального состояния. Затем процесс замедляется, так как сдерживается силой тяготения. Такая точка зрения порождает определенные вопросы, поскольку из нее следует, что с первых же мгновений существования Вселенная расширяется слишком медленно – настолько, что, согласно расчетам, нынешняя видимая ее часть диаметром 15 миллиардов световых лет должна была образоваться из слишком большой области вещества. Говоря "слишком большой", мы имеем в виду, что световые сигналы за те первые мгновения не успели бы ее пересечь. А раз так, становится непостижимой тайной, каким образом была обеспечена крупномасштабная однородность видимой Вселенной, а также тот факт, что она расширяется по всем направления с почти одинаковой скоростью (погрешность не превышает 0,1 процента). Согласно теории инфляционной Вселенной, в первые мгновения ее жизни существовали некоторые необычные формы материи – вроде тех, что рутинно используются специалистами по элементарным частицам в математических построениях, которые служат моделями для физики высоких энергий, недостижимых экспериментальным путем. Эффект особых форм материи состоял в том, что в течение какого-то очень короткого времени расширение Вселенной было ускоренным, а не замедленным, благодаря чему та огромная воображаемая сфера, которую мы сегодня называем видимой Вселенной, могла образоваться в первые мгновения Большого взрыва из гораздо меньшего сгустка материи. В результате возникает вероятность, что этот эмбриональный сгусток был достаточно маленьким, чтобы световые сигналы

успевали пересечь его в те самые первые моменты. Итог подобных умозрительных рассуждений сводится к тому, что теперь мы можем объяснить, почему Вселенная настолько однородна. Подобное ее состояние -- прямое отражение микроскопической однородности, которая была обеспечена сглаживающим действием разнородных фрикционных процессов в первые мгновения существования материи (см. рисунок 6.2).

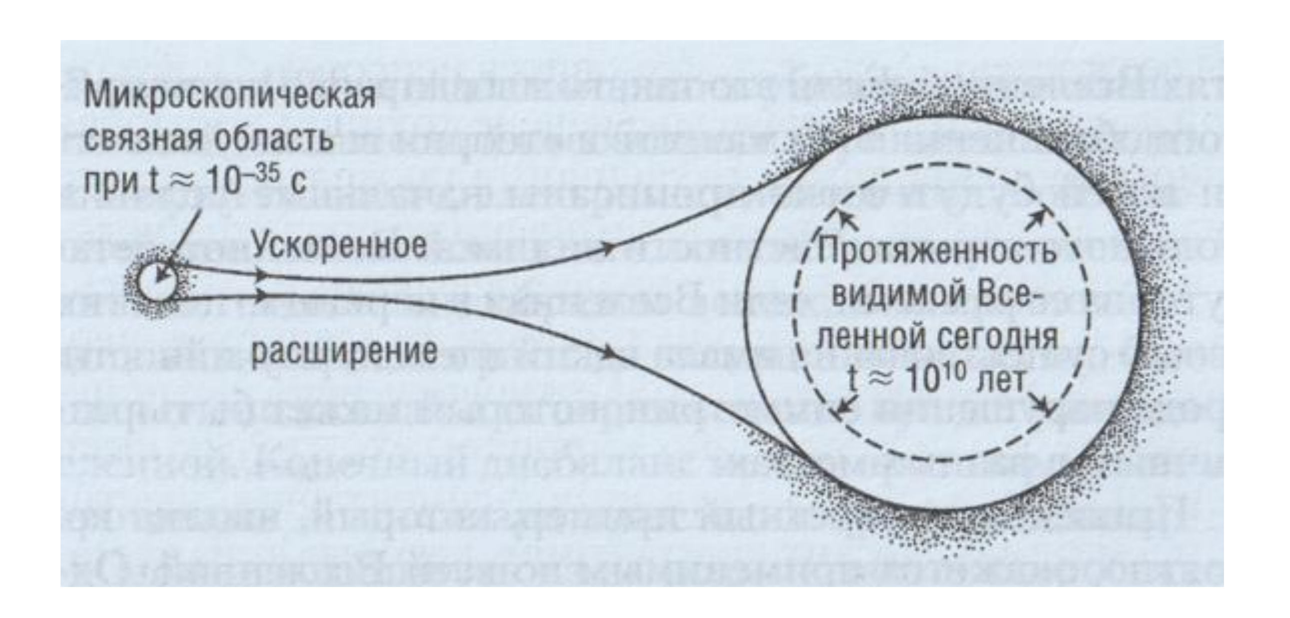


Рисунок 6.2. Отображение инфляционной модели Вселенной, где вся видимая ее часть образовалась путем ускоренного расширения односвязной области материи микроскопических размеров. Без феномена ускоренного расширения она расширилась бы до гораздо меньших размеров, чем мы наблюдаем сегодня.

Теперь представим, что Вселенная начиналась из довольно хаотического или случайного состояния, чтобы нам не пришлось строить какие-то специальные догадки насчет того, каким могло бы быть это исходное состояние. Вариации в начальных условиях означают, что некоторые области подвергаются более длительной инфляции, то есть ускоренному расширению, в первые мгновения истории Вселенной. От нарушений симметрии зависят изменения физических свойств в разных областях Вселенной вскоре после начала ее расширения. По этой причине сегменты Вселенной трансформировались различно. И только те области, которые расширялись довольно долго – больше определенного периода времени, – способны существовать достаточно, чтобы в них успела развиться жизнь. Мы населяем как раз одну из таких. Есть и другие подобные области (бесконечное множество, если Вселенная бесконечна), которые находятся за

границами нашей видимой Вселенной. Они могут очень сильно отличаться от того, что мы видим вокруг себя. Из этого следует, что никакая "теория всего" не сможет объяснить нам "все".

Она допускает существование множества видимых вселенных на основе лишь требования непротиворечивости, и мы живем в одном из многих вариантов, обеспечивающих необходимые условия для биологической эволюции. Таким образом, чтобы понять, почему наблюдаемая часть Вселенной обладает определенными свойствами, мы не можем довольствоваться одним только знанием физических законов. Многие особенности крупномасштабной структуры мироздания могут быть связаны с отличиями в нарушении симметрии в разных областях Вселенной. Если это так, то мы напрасно ждем прямого объяснения этих качеств в "теории всего", даже если в ней будут четко прописаны начальные условия Большого взрыва. Частности видимой Вселенной останутся за ее рамками, если Вселенная в первые мгновения своего существования имела некий элемент случайности, вроде нарушения симметрии, который может быть различным в разных местах.

Приведем конкретный пример, который, вполне вероятно, окажется применимым ко всей Вселенной. Одним из самых поразительных свойств видимой ее части является преобладание вещества над антивеществом. Хотя в ускорителях частиц они образуются в равных количествах, в реальном мире мы не видим ни антипланет, ни антизвезд, ни антигалактик, и нет никаких свидетельств присутствия антивещества в космических лучах, приходящих из-за пределов Солнечной системы. Мы не наблюдаем также и масштабной аннигиляции вещества и антивещества, которая должна иметь место при их соприкосновении. Таким образом, в космосе мы имеем дело с каким-то загадочным фаворитизмом. Вселенную составляет вещество, а антивещества вроде как и нет. Другой очевидный компонент – фотонное излучение. Их в окружающем нас мире видимо-невидимо. На каждый протон в среднем приходится примерно два миллиарда фотонов. Поскольку каждый раз при столкновении протона с антипротоном происходит аннигиляция и образуются два фотона света, можно рассчитать, что Вселенная, подобная нашей, где на каждый протон приходятся два миллиарда фотонов, должна возникнуть из горячего плотного состояния, где на каждый миллиард антипротонов был примерно миллиард протонов плюс один. Миллиард протонов и столько же антипротонов взаимоуничтожились, породив два миллиарда фотонов в расчете на каждый оставшийся протон. Но почему

тогда во Вселенной с самого начала завелась эта странная асимметрия вещества и антивещества?

В начале 1980-х годов появилось убедительное объяснение этой космической кособокости. При изучении единых теорий сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий выяснилось, что асимметрия должна возникать естественным образом вследствие крошечных различий в скоростях распада частиц и античастиц. Ситуация очень важная для первых этапов существования Вселенной. Конечный дисбаланс между протонами и антипротонами – миллиард плюс один против миллиарда – может возникнуть из-за асимметрии в скоростях распада. Остается вопрос: "Насколько она велика?" Некоторые теории фиксируют ее как константу, задаваемую другими физическими постоянными. Последние поддаются измерению, если ими определяются другие наблюдаемые характеристики мира элементарных частиц. Но в других концепциях этот постоянный компонент отвечает лишь за часть общей асимметрии. Есть еще другой компонент, который случайным образом варьируется в разных местах Вселенной, потому что порождается неким случайным процессом, чувствительным к местным физическим условиям, таким как плотность и температура. В этом случае дисбаланс между веществом и антивеществом может отличаться в разных частях Вселенной. И никакая "теория всего" его не определит. Опять же, есть места, где он настолько мал, что происходит почти полная аннигиляция вещества и условия, необходимые для возникновения и поддержания жизни, не появляются. Только в тех областях, где этот дисбаланс укладывается в определенные рамки, – одной из них, очевидно, является видимая часть Вселенной – возможно появление разумных наблюдателей. С их точки зрения объяснение дисбаланса вещества и антивещества содержится не в законах природы и даже не в начальных условиях. В каком-то смысле стандартного научного объяснения не существует вовсе. В разных частях Вселенной условия могут быть разные. Мы являемся свидетелями развития одной из возможностей, допускающей возникновение и эволюцию жизни. Это не вытекает по необходимости из законов природы, а просто позволяется ими. Тот факт, что подобная ситуация может относиться к числу маловероятных, не должен нас смущать. Если эвентуальными результатами "теории всего" являются миры со схожими взаимоотношениями вещества и антивещества, это будут миры необитаемые. Мы живем в одной из маловероятных альтернатив, вне зависимости от того, насколько изначально таковой она является.

В предыдущей главе говорилось, что новые разработки в концепции струн, считающейся главным кандидатом на роль "теории всего", показывают, что многие из наиболее впечатляющих черт Вселенной являются "всего лишь" результатом нарушивших симметрию процессов, имевших место на самых ранних стадиях существования Вселенной. Процесс инфляционного расширения, который, как полагают, происходил в начальные моменты истории видимой части Вселенной, вполне мог стать причиной того, что другие, более удаленные ее области обладают совсем иными свойствами. Это означает, что у нас, не исключено, так и не появится шанс объяснить все свойства видимой Вселенной через числовые параметры "теории всего". То, что мы наблюдаем вокруг себя, вероятно, является результатом – одним из многих возможных результатов – эволюции первоначальной Вселенной.

Эти примеры – не более чем иллюстрации того, что Вселенная гораздо сложнее, чем думали когда-то. Пожалуй, даже знание законов природы не позволит до конца разобраться в том, что мы видим вокруг себя. Нам неизвестно и то, где провести разграничительную линию между аспектами Вселенной, относящимися к законам, и теми, которые определяются случайностью.

То, что мы узнали из этой главы, помогает ответить на вопрос, сложен мир или прост. Если, подобно физику, специализирующемуся на элементарных частицах, вы смотрите на мир на уровне законов, он выглядит вполне простым. Существует очень небольшое число симметричных конфигураций (на самом фундаментальном уровне, возможно, даже только одна), которые задают правила игры для всего происходящего во Вселенной. Но законы природы никто никогда не видел. Нашему зрению доступны их последствия, гораздо более сложные и менее симметричные. Мы наблюдаем вокруг себя сплошь результаты действия симметричных законов, и человек, изучающий их, едва сочтет окружающий мир простым. Вот почему стало возможным, что Вселенная, вроде нашей, управляется очень небольшим числом простых законов, и при этом мы видим бесконечное число сложных состояний и структур, включая нас с вами.

Глава 7

ОРГАНИЗУЮЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Между крайностями
Проложен путь человека.

У. Б. Йейтс

Где место жизни во вселенной

Без сомнения, действия нервных клеток и пульсирование нервных волокон не нарушают никаких законов химии или физики, но, чтобы мы могли объяснить эти тонкие феномены, необходимо что-то добавить к этим наукам.

Уильям Джевонс (1873 год)

Внимание ученых, стремящихся познать фундаментальную структуру физического мира, приковано как к самым маленьким, так и к самым большим объектам. Интуитивно мы подозреваем, что главные тайны Вселенной сокрыты на пределах диапазона нашего воображения – во внутреннем мире элементарных частиц и в бескрайних просторах внешнего космоса. Но помимо размеров, времени, температуры, есть еще степени сложности объектов. Начав движение по этому пути, мы встречаем новые и удивительные качества окружающего мира и открываем, что редукционизм, к которому мы стремимся, пытаясь создать всеобъемлющую единую теорию, способную объяснить все явления, имеет пределы.

В главе 5 рассматривалась схема относительного расположения объектов Вселенной согласно их размерам (см. рисунок 5.1). На иллюстрации 7.1 воспроизведен более подробный вариант этой иерархии, где, помимо величины, учитывается также сложность объектов. К числу наиболее значимых отнесены, в порядке возрастания размеров, ядро атома водорода, более крупные атомы и молекулы, затем люди, деревья, горы, астероиды, планеты, звезды, а потом идут крупнейшие наблюдаемые нами

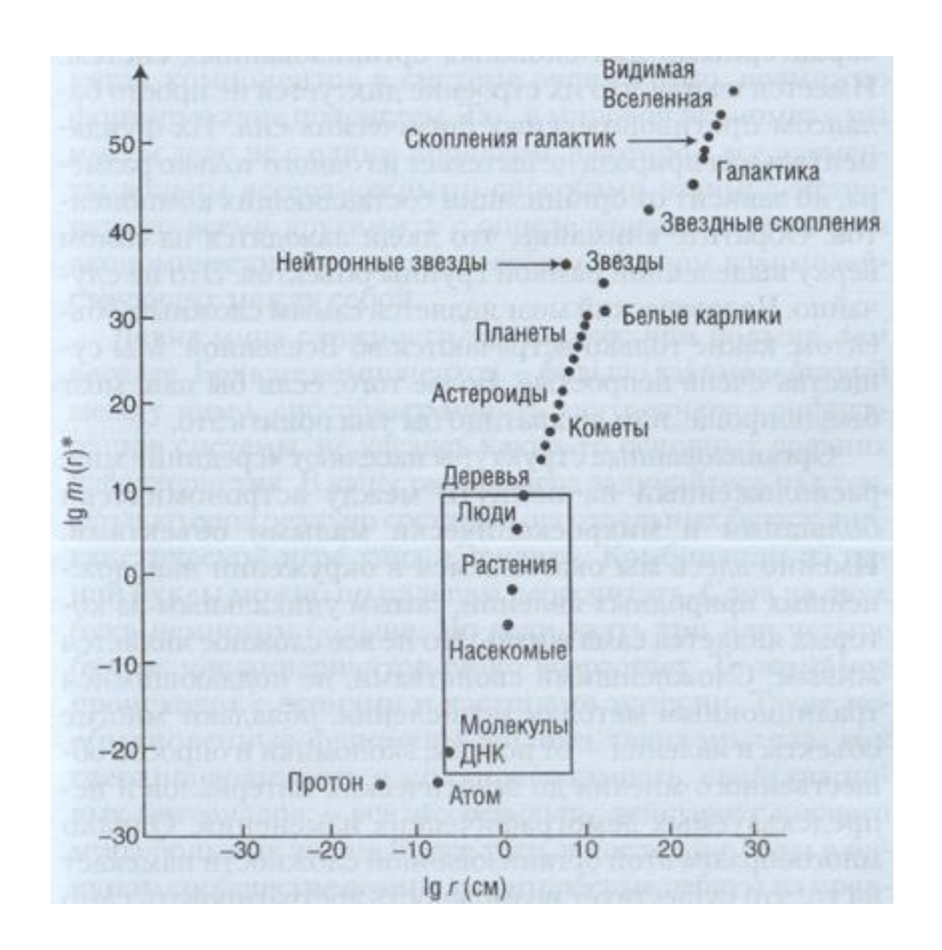


Рисунок 7.1. Диапазон размеров и масс основных известных структур, существующих во Вселенной (см. также иллюстрацию 5.1), с выделенной в рамку областью сложных организованных систем. Феномены, наблюдаемые в этой области, являются преимущественно результатом сложных взаимодействий между большим числом взаимосвязанных компонентов. Они – следствие особых форм организации последних, а не какого-то необычного действия отдельных физических сил.

астрономические структуры, такие как галактики, их скопления и, наконец, вся видимая Вселенная. В рамку на рисунке заключены структуры, обладающие свойствами, характерными для сложных организованных систем. Имеется в виду, что их строение диктуется не просто балансом противоположных физических сил. Их фундаментальная природа не вытекает из одного только размера, но зависит от организации составляющих компонентов. Обратите внимание, что люди находятся на самом верху выделенной рамкой группы объектов. Это не случайно. Человеческий мозг является самым сложным объектом, какие только встречаются во Вселенной. Мы существа очень непростые. Более того, если бы наш мозг был попроще, нам не хватило бы ума понять это.

* Имеется в виду десятичный логарифм. – Прим. перев.

Организованные структуры населяют "средний" мир, расположенный на полпути между астрономически большими и микроскопически малыми объектами. Именно здесь мы оказываемся в окружении наисложнейших природных явлений, самым уникальным из которых является сама жизнь. Но не все сложное является живым. Сложнейшими свойствами, не поддающимися традиционным методам исчисления, обладают многие объекты и явления – от погоды, экономики и опросов общественного мнения до экзотических материалов и непредсказуемых демографических изменений. Однако многообразие этой организованной сложности намекает на то, что существует возможность абстрагировать само понятие из его частных проявлений, наблюдаемых нами, и отыскать какие-то общие принципы, управляющие ее рождением и развитием.

Из опыта мы знает, что сложность и структурная организация многих вещей проистекают попросту из самой их многочисленности. Поведение одиноко живущего человека может быть сравнительно простым, но появись рядом еще кто-то, и уже возникнут новые типы сложного межличностного взаимодействия. Добавив третьего – сложность поведения каждого из троих только увеличится. Ну а если еще дюжину, тогда они и горы свернут. Так же обстоит дело с атомами или электронами. Целое становится гораздо больше суммы составляющих ее частей. Одна из причин этого заключается в том, что, когда компонентов в системе очень много, возможно формирование подсистем. Так, в мировой экономике мы имеем дело не с одним порядком, в котором все элементы вольны всевозможными способами взаимодействовать со всеми другими, а с определенным количеством экономических подсистем, особым образом взаимодействующих между собой.

Девиз мира сложности звучит так: чем больше, тем веселее. Больше компонентов – больше взаимодействий между ними, способных менять внутреннюю конфигурацию системы, не касаясь каких-то основных средних характеристик. В качестве примера задумайтесь над тем, сколько слов реально составить из отдельных букв в лингвистической игре типа "Эрудит". Комбинации из одной буквы можно по пальцам пересчитать. Слов из двух букв немногим больше. Но если взять три или четыре буквы, число вариантов резко возрастает. То же самое происходит с атомами и частицами материи. Такие необыкновенные феномены физики твердого тела, как сверхпроводимость и полупроводимость, свойства новых материалов – все это результат действия сложного мира больших чисел. Более того, в последние годы в научном сообществе возникли интересные дебаты на

предмет относительной значимости этих феноменов в сравнении с традиционной наукой. Если полистать современные научно-популярные книги, сразу станет ясно, что в них превалируют рассказы о космологии, черных дырах и элементарных частицах. Эти противоположности спектра размеров воспринимаются как наиболее фундаментальные и естественные кандидаты на звание "науки наук". Промежуточный, обыденный мир физики твердого тела многим не кажется ни основательным, ни интересным. Даже профессионалы находят его прискучившим. Но перед теми, кто все-таки почувствовал вкус к сложным природным феноменам, мы в неоплатном долгу. Благодаря их трудам у нас есть материалы и технологи, обеспечивающие комфорт современной жизни. С этим, собственно, никто никогда не спорил, но ученые, работающие в данной области, хотят, чтобы к их деятельности относились как к науке по-своему не менее фундаментальной, нежели космология или физика элементарных частиц. Эта дискуссия разгорелась в некоторых западных странах, когда решались вопросы о финансировании масштабных экспериментальных проектов, призванных раздвинуть научные горизонты астрономии и физики элементарных частиц. Специалисты по физике твердого тела, металлурги, химики, разработчики новых материалов утверждают, что их научные дисциплины заслуживают такого же уровня государственных дотаций. Физики, занимающиеся элементарными частицами, в ответ говорят, что их наука более фундаментальная. Кто прав?

По сути, этот вопрос не новый. Перед нами все та же проблема редукционизма, которая традиционно интересовала больше биологов и представителей смежных дисциплин, объединяемых в категорию наук о жизни. Завзятый редукционист видит в науке прямолинейную иерархию. Зоология редуцируется к биологии, как науке более фундаментальной. В свою очередь, биология целиком построена на химии; можно показать, что последняя основывается на физике, а та сводится к самым элементарным частицам вещества. Когда мы их отыщем – неважно, точки они или струны, – эта линейная цепочка будет завершена. Таким образом, на каждой стадии, по мнению горячего сторонника редукционизма, возникает вопрос "почему", который всегда указывает в одну и ту же сторону: внутрь, к меньшим масштабам. Стивен Вайнберг, лауреат Нобелевской премии за исследования в области элементарных частиц, использует эту точку зрения как дополнительный аргумент в пользу финансирования проектов по созданию ускорителя частиц, отвечая на критику со стороны многих специалистов в области физики твердого тела:

"Полагаясь на эту интуитивную идею, что одни обобщения объясняются другими, мы обретаем чувство направления в науке. Существуют своего рода стрелки-указатели, разбросанные по всему пространству обобщений. Из них складывается общая картина, и обнаруживается замечательная вещь, возможно, самое великое из всех научных открытий: они сходятся к общему источнику! Начните с любой научной дисциплины и, подобно неугомонному ребенку, продолжите задавать вопрос “почему?”. Постепенно вы дойдете до уровня элементарных частиц... Если стрелки научного объяснения действительно сходятся к одному общему источнику, то физика элементарных частиц является максимальным приближением к нему. Сегодняшняя физика элементарных частиц – это не только самый глубокий уровень знаний, доступный на данный момент, но и высокая степень точности абсолютных значений, возможно, очень близких к финальному источнику".

Это мнение – апелляция к перспективе открытия "теории всего". Вайнберг не сомневается в том, что "теория всего" возможна и мы вскоре решим эту проблему:

"Есть основания верить в то, что благодаря физике элементарных частиц мы узнаем глубинную логику Вселенной. Я утверждаю это потому, что, изучая все более высокие энергии и все меньшие структуры, мы обнаруживаем, что законы природы, физические принципы, описывающие наши знания, становятся все проще и проще... Правила, открываемые нами, становятся все более когерентными и универсальными. Мы начинаем подозревать, что совсем не случайно данные конкретные проблемы были выбраны для изучения в данный конкретный исторический период. В законах, управляющих материей, есть простота, красота, отражающая нечто встроенное в логическую структуру Вселенной на каком-то очень глубоком уровне".

В утверждениях рьяных редукционистов, разумеется, есть своя правда. Нет оснований думать, что материя, с которой работают биологи, состоит из чего-то кроме атомов и молекул (а их изучает химия), а те – из чего-то кроме элементарных частиц, изучением которых занимается физик. Но это все равно что сказать: "Пъета" Микеланджело сделана не из чего иного, как из мрамора. Такой редукционизм слишком тривиален. Он имел какой- то смысл лишь в те времена, когда в ходу были безосновательные спекуляции насчет

некоего таинственного вещества (флогистона), содержащегося в огне, или загадочного "жизненного порыва", которым обладают все "живые" существа. Когда мы сводим воедино простые вещи, они образуют комбинации, демонстрирующие гораздо больше разнообразия в возможных действиях, нежели это было бы с простой суммой частей. Таким образом, по мере возрастания сложности или количества ингредиентов рождаются качественно новые феномены. Такую ситуацию ранние виталисты не предвидели. К. Х. Уэддингтон писал по этому поводу:

> "Витализм сводится к утверждению, что живые существа не ведут себя так, как если были бы механизмами, созданными из одних лишь материальных компонентов, но это подразумевает, что мы должны знать, каковы эти последние и какого рода механизмы из них могут быть построены".

Стоящий на столе компьютер на каком-то уровне действительно можно назвать комбинацией 10^{27} протонов, нейтронов и электронов, но ясно, что значение имеет, каким образом эти субатомные частицы сложены между собой, как организованы, потому что именно этим компьютер отличается от просто совокупности 10^{27} отдельных субатомных частиц. Получается, что компьютер представляет собой нечто качественно большее по сравнению с суммой составляющих его частиц, и это достигается за счет особых способов соединения атомов в разных материалах и особых методов их соединения в интегральные схемы и переключатели. Свойства компьютера суть проявление определенного уровня и качества достигнутой сложности. Чем больше и сложнее его внутренние логические схемы, тем большими возможностями он обладает.

Эти примеры показывают, что подобный редукционизм, когда все объяснения сложных вещей нужно искать на низших уровнях и, в конечном счете, в мире самых элементарных компонентов вещества, это ложный путь. Ведь, переходя из мира кварков к нуклонам, потом к атомам, молекулам, агрегатным состояниям материи, на каждом уровне мы можем ожидать обнаружения новых типов сложной организации. Каждая из новых форм поведения, по существу, является проявлением достижения определенного уровня организации в данной среде. Одно из самых ярких отличий между такими сложными явлениями и более простыми феноменами, которые относятся к сфере физики элементарных частиц, заключается в том, что последние, как принято считать, полностью проявили себя на определенных этапах истории Вселенной. Если вернуться во времени назад, достаточно

близко к моменту возникновения мироздания, то мы должны были бы наткнуться на довольно экстремальные природные условия, в которых самые фундаментальные частицы существовали в свободном состоянии. Для этого не требуется ничего, кроме высокой температуры. Но с проявлениями сложности дело обстоит иначе. Они обычно очень чувствительны ко многим факторам окружающей среды и "естественным" образом не возникают. Это означает, что зачастую приходится искусственно создавать особые условия для проявления этих феноменов. Некоторые из них удается воспроизводить в лабораторных условиях, но в самой природе они никогда не проявляются. Это очень отрезвляющая мысль: такие свойства вещества, как высокотемпературная сверхпроводимость, могли никогда не возникнуть естественным путем за всю историю Вселенной. Они дремлют в законах природы, но проявиться могут только при выполнении сугубо частных, искусственных условий и только тогда, когда материя организована необычным и "неестественным" образом.

Жизнь, какой мы ее знаем и отчасти понимаем, является классическим примером того, что может произойти, когда достигнут достаточный уровень сложности. А сознание кажется проявлением еще более сложного уровня организации. Соответственно, оба эти феномена очень чувствительно настроены на факторы окружающей среды, в которой они существуют. Удивляться не приходится, если вспомнить, что они являются продуктами процесса естественного отбора, где среда играет ключевую роль в выборе тех выигрышных атрибутов, которые будут переданы следующим поколениям. Однако удивительно, что та форма жизни, которую мы знаем и коей являемся, очень восприимчива к астрономической среде и даже к формам физических законов и констант.

В среде биологов нет согласия в вопросе общего определения жизни. Наши опытные знания возможных форм жизни весьма ограничены (некоторые наиболее известные примеры представлены на рисунке 7.2). Но даже в отсутствие согласия по поводу того, какие свойства необходимо иметь, чтобы считаться "живым", консенсус в плане достаточных условий более-менее достигнут. Любые попытки очертить необходимые условия, как правило, скатываются на уровень очень узкой спецификации качеств, которая, по существу, представляет собой не более чем описание уже известных форм жизни. Гораздо более полезным является утверждение, что для права называться "живым" достаточно иметь способность к воспроизводству в некоторой среде и определенный уровень организации,

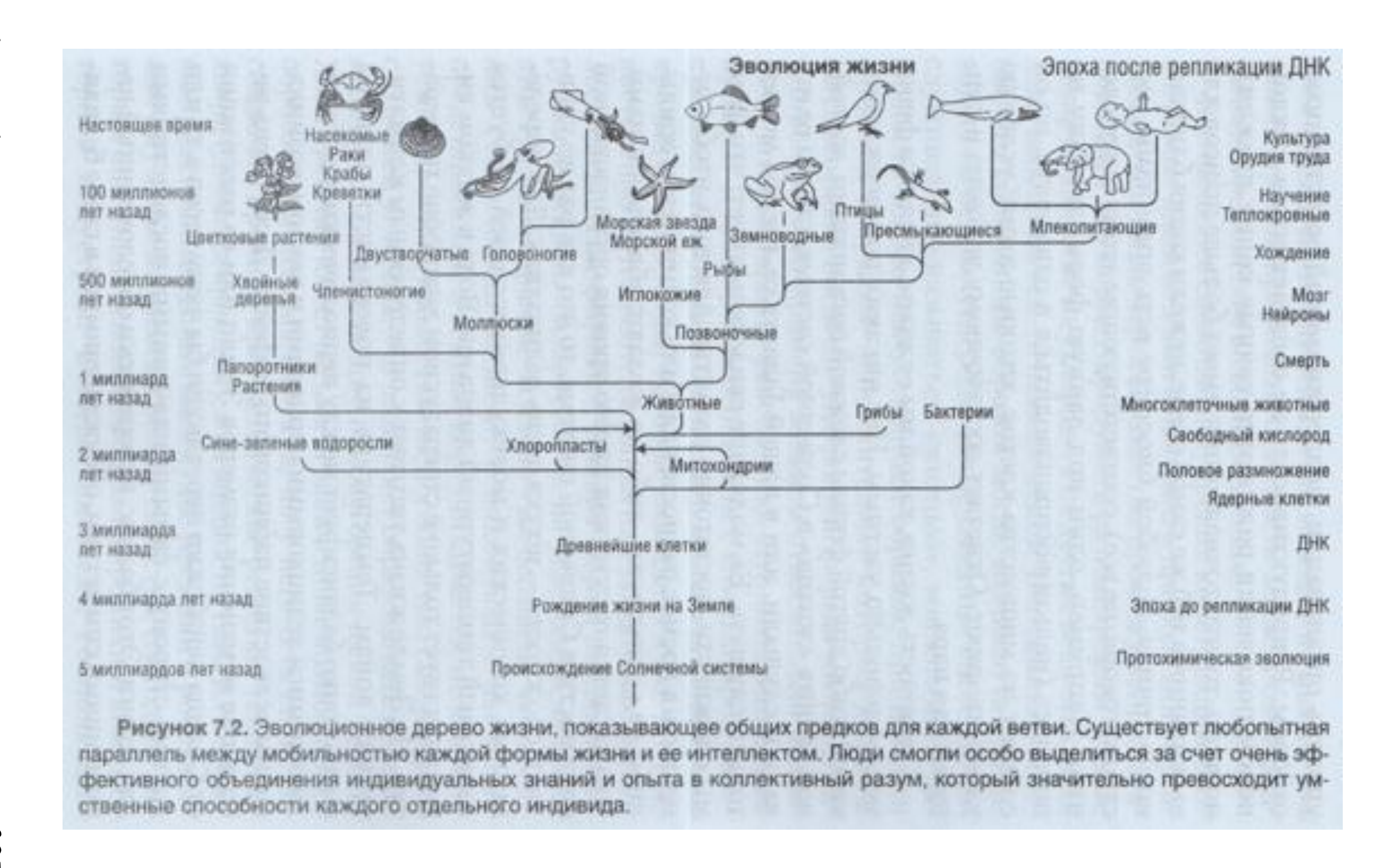


Рисунок 7.2. Эволюционное дерево жизни, показывающее общих предков для каждой ветви. Существует любопытная параллель между мобильностью каждой формы жизни и ее интеллектом. Люди смогли особо выделиться за счет очень эффективного объединения индивидуальных знаний и опыта в коллективный разум, который значительно превосходит умственные способности каждого отдельного индивида.

поддерживаемый естественным отбором. Репродуктивность не означает, что в каждом новом поколении рождаются точные копии прежних, но лишь то, что точная копия имеет больше шансов для выживания в той же самой среде, нежели копия близкая, но не точная. В любой биосфере есть организмы (но, строго говоря, не все), соответствующие этому определению. Например, один под данную формулировку не попадает (нельзя воспроизводиться в одиночку), но он состоит из множества клеток, которые этому условию удовлетворяют. Отвечает достаточному условию и супружеская пара.

Сложность жизни, какой мы ее знаем, является феноменом довольно частным. Нет никаких подтверждений какой-либо другой формы сложной организации, достойной звания "жизни" в Солнечной системе, где мы ее искали и слушали, или в нашей Галактике, где мы можем только слушать. Ее молчание свидетельствует, что формы сложности, достаточно развитые для того, чтобы отправить в космос радиосигналы или космические зонды, либо не существуют, либо не желают общаться с нами. Что касается отсутствия такого уровня организованной сложности в Солнечной системе, то это как раз не удивляет: сложность – штука очень деликатная. Для определенных химических и молекулярных связей требуется известный температурный диапазон. Вода в жидком виде существует только в стоградусном диапазоне температур. На Земле жизнь тяготеет к определенным климатическим зонам. Температура на поверхности планеты очень тонко балансирует между периодически возобновляющимися ледниковыми периодами и пеклом, возникающим вследствие парникового эффекта. Даже очень небольшие изменения размеров Земли или ее расстояния от Солнца неизбежно перетянули бы чашу весов в ту или другую сторону с самыми плачевными последствиями для жизни. Этот баланс, исторически обусловленный нарушениями симметрии, обсуждавшимися в главе 6, является чрезвычайно хрупким, и это наводит на мысль, что такого уровня природная сложность должна быть редчайшим феноменом во всей Вселенной.

Все наиболее сложные и мудреные конструкции, дозволяемые физическими законами, в природе могут реализоваться лишь через множество промежуточных этапов. Хотя кто мешает придумать разные формы жизни, базирующиеся не на углероде, а на других веществах или даже вообще на чем-то нехимическом. Биохимики уверены, что спонтанным образом могла возникнуть только жизнь на основе углерода. Иные сложные системы, заслуживающие называться "жизнью", воплотимы в реальность только искусственным образом, при помощи сложных операций, исполнителями которых должны быть все равно носители углеродной формы жизни. В качестве простого примера возьмем относительно

недавнюю компьютерную революцию. Это эволюционный процесс. Поколения персональных компьютеров "воспроизводятся" на заводах, и каждая новая модель лучше предыдущей. Бренды, которые оказались хуже других, постепенно вытесняются с рынка или захватываются более успешными фирмами. Данная форма эволюционирующей "жизни" базируется не на углероде, а на кремнии. Писатели-фантасты давно уже осознали, что кремний (химический элемент, в наибольшем изобилии представленный в земной коре) отличается необычной устойчивостью, гибкостью и способностью связываться с атомами углерода, что позволяет образовывать цепные молекулы, составляющие основу органической химии. Хотя кремний имеет весьма ограниченные возможности образования цепных молекул, но у него есть свойство создавать прочные кристаллические решетки, такие как кварц (диоксид кремния), а не жидкости, газы или сложные реактивные цепные молекулы. Кремний и родственные ему элементы имеют общие свойства, благодаря которым они стали основой микроэлектроники и компьютерной индустрии. Сегодня писатель, сочиняющий футуристическую историю о кремниевом господстве, будет опираться в своих прогнозах не на химические свойства кремния, а на физические. Но эта форма развивалась не самопроизвольно: катализатором для нее послужила такая углеродная форма, как мы – люди.

Мир компьютерных чипов, которые становятся все меньше и при этом работают все быстрее, является достаточно правдоподобной будущей "формой жизни", технически более компетентной по сравнению с нами. Чем меньшего размера чипы можно сделать, тем меньше энергии они требуют. Тончайшие слои материала толщиной всего в несколько атомов позволяют тонко настраивать электронные свойства материала и делать его гораздо более эффективным. Первые транзисторы изготавливали из германия, но они были ненадежными и давали сбои при высоких температурах. Люди, научившись выращивать высококачественные кремниевые кристаллы, стали использовать их в производстве более быстрых и надежных кремниевых транзисторов и интегральных схем. Новейшие материалы, такие как арсенид галлия, пропускают через электроны еще быстрее, чем кремний, и на их основе стало возможным создание суперкомпьютеров "Cray". Эволюция компьютерной мощи наглядно представлена на рисунке 7.3. Нет сомнений, что в дальнейшем верх возьмут какие-то другие материалы. Возможно также, что история сделает полный круг и вернется к углероду. Чистый углерод в форме алмаза является отличным проводником тепла, и это свойство имеет немаловажное значение в условиях плотно упакованных микрочипов.

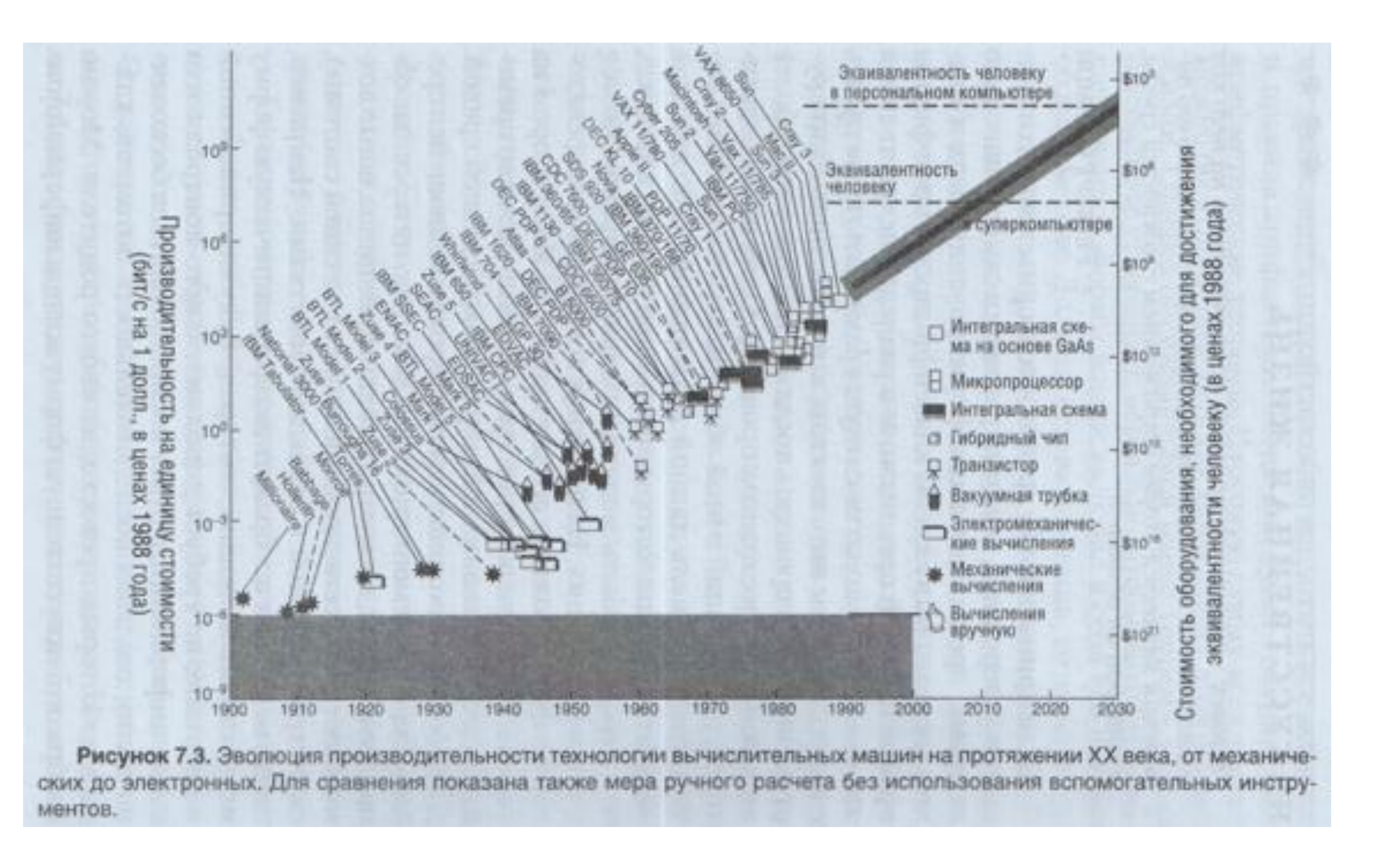


Рисунок 7.3. Эволюция производительности технологии вычислительных машин на протяжении XX века, от механических до электронных. Для сравнения показана также мера ручного расчета без использования вспомогательных инструментов.

Искусственная жизнь

Человек – существо простое, если смотреть на него как на поведенческую систему. Кажущаяся сложность его поведения является скорее отражением сложности среды, в которой он обитает.

Герберт Саймон

Если принять точку зрения, что формы жизни, отличные от углеродных, не могли развиться самопроизвольно за время, прошедшее после формирования звезд и планет, тогда мы вынуждены классифицировать эти формы крайне сложной организации в разделе "искусственная жизнь". Данное понятие следует сравнивать, но не путать с искусственным интеллектом, который лишь имитирует когнитивные процессы, тогда как нас интересует более широкий спектр сложных процедур. Один из исследователей, работающий в этой области, описал наиболее оптимистичную цель данной дисциплины как желание "создать образцы, которые настолько похожи на живые, что перестают быть моделями жизни, а превращаются в примеры жизни". На практике все сводится к исследованию форм сложных организаций, с особым упором на те разновидности, которые трансформируются со временем и активно взаимодействуют с окружающей средой. Даже без учета воздействия со стороны меняющейся среды можно продемонстрировать довольно интересные общие результаты, иллюстрирующие принципиальные возможности искусственной жизни (или сложной системы), сконструированной с особыми свойствами. Например, ничто не мешает вообразить детерминистическую форму искусственной жизни, которая, будучи приведенной в действие, не требует дополнительного контроля или ввода информации, а будет воспроизводиться бесконечно долго, создавая последовательность потомков, каждый из которых превосходит своего родителя. Можно вообразить искусственную форму жизни, информационное хранилище которой способно воплотить все аксиомы и правила арифметики. Тогда она будет генерировать арифметические теоремы. Итоговую сумму всех теорем можно было бы определить, как "интеллект" этой формы жизни. Однако обсуждавшаяся ранее теорема Гёделя о неполноте утверждает: нереально, чтобы интеллект вышеназванной формы жизни включал в себя все истины об арифметике. Должны оставаться вещи, которые нельзя ни доказать, ни

опровергнуть. Но когда организм обнаруживает (насколько это ему под силу), что какое-то арифметическое высказывание нельзя ни доказать, ни опровергнуть на основе имеющейся системы аксиом, тогда он просто прибавляет это недоказуемое утверждение к списку аксиом. Увеличенная система аксиом, однако, все равно обречена оставаться неполной, по организм развивается дальше, повторяя ту же самую процедуру еще раз: выявляет неразрешимые в существующей системе аксиом высказывания, включает их в число аксиом и таким образом становится все умнее, потому что каждое новое поколение способно доказывать все те теоремы, которые доказывали предки (причем некоторые из них гораздо быстрее и эффективнее за счет возможностей построения более коротких цепочек логического вывода, предоставляемых дополнительными аксиомами), плюс какие-то еще. Информационное содержание каждого потомка превышает информационное содержание предков. Ситуацию можно усложнить тем, что у одного родителя могут быть два отпрыска, один из которых включает в систему аксиом само недоказуемое высказывание, а другой – его отрицание.

Главными чертами, характеризующими дедуктивные способности любой формы сложной организации, являются скорость обработки информации (то есть превращения одного набора чисел в другой) и объем памяти. От размера последней зависит, насколько быстро система учится и приспосабливается к переменам. На рисунке 7.4 мы можем увидеть сравнение этих атрибутов в широком ряде сложных систем, одни из которых могут рассматриваться как живые, а другие нет.

Смутное разграничение между "живыми" и "неживыми" системами мы склонны строить на том основании, что живое всегда мягкое и теплое, а неживое – твердое и металлическое. Компьютеры и кристаллы не похожи на известные нам формы жизни. Но такое разграничение нельзя не признать субъективным, особенно если мы оглянемся на последовательность событий, обусловивших эволюцию углеродной жизни, из которой вышла существующая флора и фауна.

Грэм Кернс-Смит из университета Глазго высказал предположение, что природная форма жизни, наблюдаемая сегодня, возможно, не была главным источником сложных систем, построенных на химии углерода, характерной для ныне существующих живых организмов. В своем сценарии "генетического захвата" он предполагает, что первыми "организмами" были крошечные кристаллы глины*, которые менялись за счет известных процессов разлома и кристаллического роста.

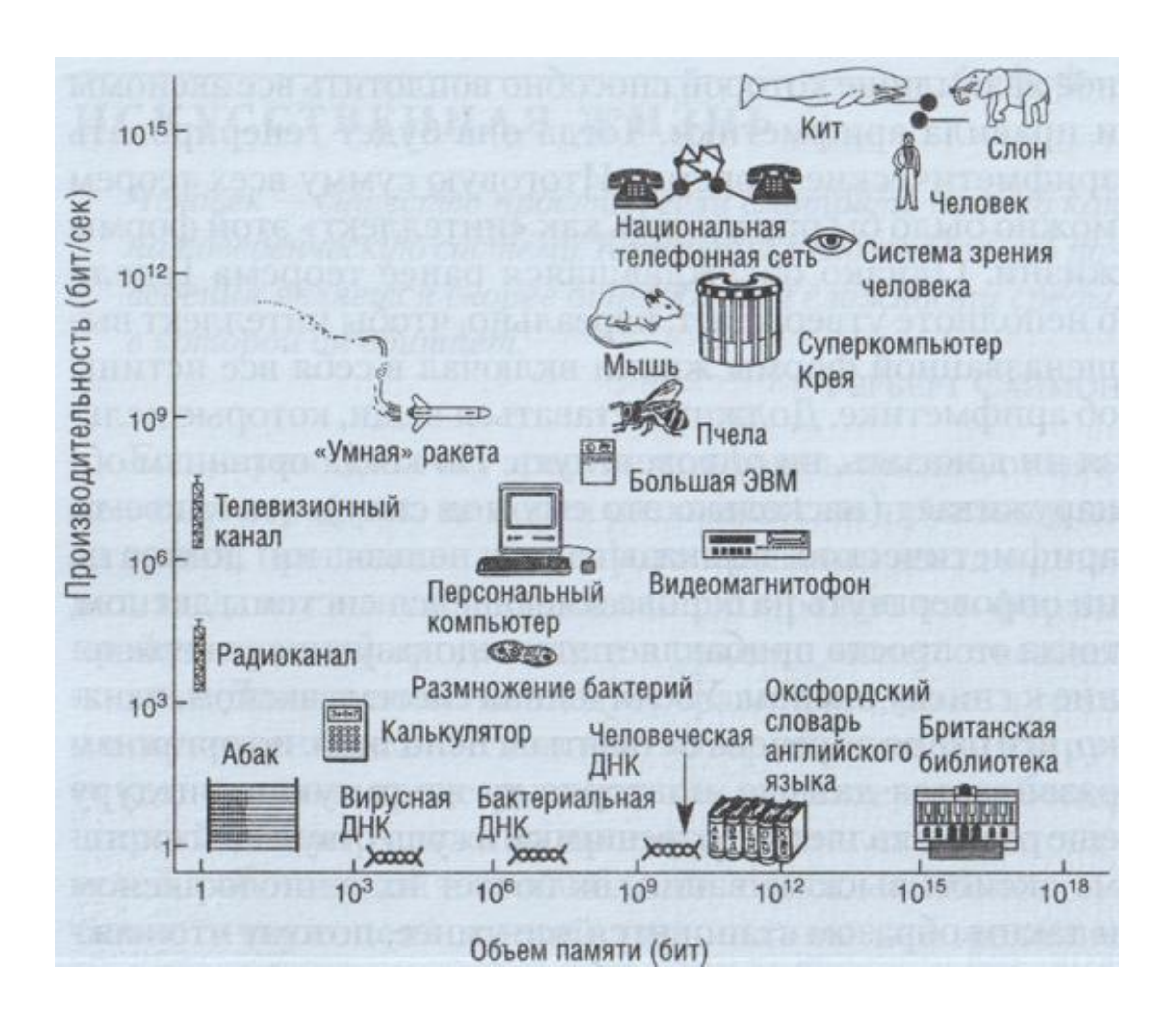


Рисунок 7.4. Производительность и емкость памяти различных живых организмов и продуктов человеческих технологий.

Узор кристаллической решетки содержит различные нарушения симметрии, называемые дефектами. Последние играют важную роль в истории глины, потому что влияют на ее физические и химические свойства, меняя ее эффективность как катализатора в химических реакциях с соседними веществами. С течением времени, предполагает Кернс-Смит,

* Малоизвестный исторический факт: теолог эпохи Реформации Мартин Лютер первым предусмотрел возможность жизни, основанной на глине. Он писал, что "если бы Бог спросил у меня совета, я бы предложил Ему продолжать лепить новые виды животных из глины".

некоторые кристаллы случайным образом инкорпорировали прилегающие углеродные соединения, обладающие способностью делать более сложные вещи, сохранять конфигурации и в конечном счете вырабатывать молекулы, способные к самовоспроизводству. Стоило этому процессу только начаться, как кристаллическая основа была стремительно захвачена более эффективным углеродным аппаратом. Эволюционным следствием стали основанные на углероде формы жизни, в которых почти не осталось следов их кристаллического происхождения. Весь этот процесс генетического захвата по стилю напоминает завоевание британской автомобильной промышленности японскими компаниями или, быть может, будущий переход нынешней органической химии под власть кремния. Более того, на более глубоком уровне этот процесс присущ большинству наших интеллектуальных и культурных тенденций. Когда кто-то высказывает новый тезис, его зачастую подхватывает другой новатор, который поначалу думает о нем в том же контексте, что и его родоначальник, но затем находит возможность для усовершенствования идеи и переноса ее сути в иной контекст. В результате, перехваченная другим умом, идея эволюционирует.

Экскурс в базовые вопросы жизни потребовался нам ввиду того внимания, которое современные исследователи уделяют познанию и имитации жизни. Под крылом междисциплинарного направления, получившего название когнитивной науки, собрались многочисленные ученые, пытающиеся разобраться в таких сложных и многогранных системах, которые принято называть живыми. Однако наш интерес к системам мотивируется исключительно тем фактом, что живые системы являются самыми сложными из наблюдаемых в мире объектов, а отнюдь не желанием придать им какую-то сверхъестественную значимость.

Мы видели, что наивный редукционизм, пытающийся свести все сущее к мельчайшим компонентам, является заблуждением. Если есть желание до конца разобраться в сложных системах, особенно в тех, которые являются случайными последствиями естественного отбора, тогда нужно иметь нечто большее по сравнению с существующими ныне теориями, претендующими на звание "теории всего". Необходимо выяснить, существуют ли общие принципы, управляющие развитием сложных систем в целом, которые можно было бы применить к различным ситуациям без того, чтобы слишком впутываться в их специфику и частности. Может быть, реален целый набор базовых правил развития сложных систем, сводящийся к каким-то более простым законам природы в ситуациях, когда уровень сложности сходит на нет? Если такие правила действительно есть, тогда они действуют совсем не

так, как законы, которые пытаются найти физики, специализирующиеся на элементарных частицах. Но имеются ли хоть какие-то свидетельства в пользу возможного существования таковых принципов?

Время

Если бы на земле было все благоразумно, то ничего бы и не произошло.

Федор Достоевский

Природа времени – одна из тех мучительных проблем, над которыми физики спорят столетиями, но к разгадке приближаются удручающе медленно. Новые научные концепции, будь то теория относительности или квантовая теория, неизбежно заставляют нас под другим углом взглянуть на природу времени, но при этом не замещают старые теории времени новыми, а лишь добавляют очередную порцию головоломок в придачу к уже имеющимся. Тысячи лет философы, обсуждая природу времени, мечутся из одной крайности в другую, и современная мода на исследования организованных сложных систем может сигнализировать о том, что внимание ученых сфокусировалось на той, которая на протяжении большей части XX века оставалась в тени.

Еще в древнегреческой философии существовала школа мыслителей, признававших время важным действующим фактором происходящих в природе процессов. Аристотель и Гераклит рассматривали наблюдаемый "мир явлений" как истинную реальность, которую только и нужно пытаться понять и исследовать. Резко контрастировала с этим прагматичным подходом традиция оставлять время за рамками исследуемой действительности. Родоначальником данной точки зрения был Парменид, а наиболее ярким и известным представителем – Платон. Время должно быть скрыто или редуцировано к чему-то другому. Платон добился этого, придав высшее значение потусторонним формам, которые служили идеальными прообразами всех видимых феноменов, являющихся их бледной, несовершенной тенью. Здесь мы видим принижение значения времени. Ему

неподвластны эти вечные совершенные формы. Изменчивость присуща лишь несовершенным теням, приближениям, наблюдаемым в окружающем мире, а значит, время не имеет отношения к истинной сути вещей. Такое мировоззрение находило явное отражение в древнегреческой математике и естествознании. Ученые тех времен больше интересовались тем, что мы сегодня называем статикой: идеальные окружности, инвариантные гармонии, значения безразмерных констант. Платоновскому идеализму свойственно приписывать определенную неизменность высшим реалиям.

Ньютон и те ученые, что шли по его стопам, статичными гармониями, напротив, не слишком интересовались. Для них законы природы были законами перемен. Их интересовала динамика, в которой время должно было играть роль явную. Но пролить сколько-нибудь света на природу времени им не удалось. Стремясь не утонуть в бесконечных "гипотезах", Ньютон писал на первых страницах своих "Начал":

> "Время, пространство, место и движение составляют понятия общеизвестные. Однако необходимо заметить, что эти понятия обыкновенно относятся к тому, что постигается нашими чувствами".

Он пытался возвести время в ранг фиксированного внешнего стандарта, на который не способны повлиять никакие события, происходящие во Вселенной. Такая позиция отличается от обыденного представления, всегда ассоциирующего течение времени с какой-то последовательностью событий (как, например, движение солнца по небосводу), а значит, в некоторых аспектах природа времени непосредственно увязывается с этими явлениями и объектами.

В посленьютоновскую эру возникла новая точка зрения. Постепенно она заняла доминирующее положение в научном сообществе, так что до сравнительно недавнего времени ее держались большинство физиков. Обнаружилось, что в природе имеются сохраняемые величины, такие как общее количество энергии или общее количество движения. Таким образом, несмотря на внешнюю видимость перемен, в некоторых сложных естественных процессах всегда присутствует некий неизменный фундаментальный аспект, отражающий инвариантность законов природы. Следовательно, существует возможность представить все традиционные законы движения через эквивалентные утверждения, в которых какие-то величины остаются неизменными. И здесь мы видим призрак платоновских теорий. Время свергается с пьедестала, и инвариантность некоторых вещей воспринимается как более фундаментальная по сравнению с законами,

которые управляют происходящими во времени переменами, дозволенными этими инвариантами.

С начала 1970-х годов до самого недавнего времени этот подход служил опорой для драматического прогресса, достигнутого физикой элементарных частиц в рамках калибровочных теорий, с которыми мы познакомились в главе 4. Эти концепции выводят законы преобразований из трансмутаций элементарных частиц и взаимодействий между ними на основе предположения об инвариантности определенных вещей относительно некоторых классов преобразований в пространстве и времени. Успешность подобного подхода укрепила общую тенденцию придавать наибольшее значение неподвластным времени аспектам действительности: сохраняемым физическим величинам и связанным с ними симметриям, равновесиям и инвариантностям. Только в последнее время акценты несколько сместились. Опять оживился интерес к частностям в противовес общему. Как обсуждалось в главе, посвященной нарушениям симметрии, это было связано с осознанием того факта, что результаты действия физических законов в своем многообразии неизмеримо богаче самих законов. Внимание ученых сосредоточилось на эволюции сложных систем, нарушениях симметрии и хаотическом поведении. Здесь время играет первостепенную роль. Значение же инвариантности мало, поскольку не проливает света на важнейшие свойства рассматриваемых феноменов. Существует фундаментальная причина, почему последние обязательно противопоставляются поиску неподвластных времени инвариантов природы. Когда мы сталкиваемся с последовательностью событий, которая оказывается алгоритмически несжимаемой, это означает, что она не поддается сокращенному описанию. Ее нельзя уместить в какую-то простую формулу, имеющую такое же информационное содержание. Из чего, в частности, следует, что алгоритмически несжимаемый процесс не может быть заменен каким-нибудь принципом инвариантности. Для описания всей последовательности нужна вся последовательность, и ничем меньшим удовлетвориться нельзя. Таким образом, мы видим здесь аристотелевский акцент на событиях, и связь между ними вновь приобретает важнейшее значение при описании мироздания, в то время как инвариантности отходят на второй план. В исследованиях мира элементарных частиц проводниками нам служат инварианты. Когда же наше внимание приковано к "среднему" миру, где доминирует сложная организованность структур, мы обнаруживаем, что время и перемены являются важными и необходимыми качествами ткани мироздания.

Организующие принципы

Три закона роботехники

1. Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред.

2. Робот должен повиноваться командам человека, если эти команды не противоречат первому закону.

3. Робот должен заботиться о своей безопасности в той мере, в которой это не противоречит первому или второму законам.

Айзек Азимов

Организующие принципы отличаются от классических законов природы тем, что они применимы только к системам финитных размеров. Они не диктуют элементарным частицам, как тем двигаться, а ограничиваются тем, что определяют конфигурацию различных комплексов объектов, упорядочивают их. Хорошо известным примером служит так называемое второе начало термодинамики. Говоря простым языком, оно гласит, что степень беспорядка (которую можно определить точно) в замкнутой системе с течением времени не может уменьшаться. Этот закон, кажущийся очевидным во многих практических аспектах, с момента открытия будоражит умы людей, причем далеко не только физиков. Не приходится удивляться тому, что он положил начало целой научной дисциплине во второй половине XIX века, в самый разгар промышленной революции. Изучение паровых двигателей привело не только к пониманию процессов деградации энергии из полезных и упорядоченных форм в бесполезные и беспорядочные, но также ко взгляду на Вселенную как на огромный механизм, медленно движущийся навстречу тепловой космической смерти. Такая точка зрения в первые десятилетия XX века породила любопытный философский пессимизм, и разговоры о втором законе термодинамики вошли в моду в литературных кругах. Достаточно вспомнить Ч. П. Сноу, который считал знание второго начала термодинамики критерием научной грамотности для далеких от науки людей: не знать о нем – это как если бы физик ничего не слышал о Шекспире. О втором начале

термодинамики в свете современных научных знаний можно было бы много чего сказать, но мы сосредоточимся на его универсальности. Таким свойством должен обладать любой физический принцип, претендующий на способность управлять развитием сложных систем во всей Вселенной.

Второму закону термодинамики повинуются тепловые двигатели и химические реакции, и это никого не удивляет. Но в середине 1970-х годов было сделано достаточно неожиданное открытие, удивившее физиков и обновившее их веру во второе начало термодинамики как направляющий принцип в сфере даже тех естественных наук, которые весьма далеки от дисциплин, игравших непосредственную роль повивальных бабок при рождении этого принципа. В нем виделся посыл, руководящий гораздо более сложными концепциями. В начале 1970-х годов астрофизики были взволнованы первыми открытиями, позволявшими проникнуть в детали структуры черных дыр. Последние принадлежат к числу простейших объектов Вселенной. Они возникают тогда, когда огромная масса под действием силы тяготения сосредоточивается в достаточно малом объеме пространства. Силы результирующего гравитационного поля достаточно для возникновения воображаемой границы, "горизонта", который окружает черную дыру, не выпускает обратно ни частицу, ни световой сигнал, попавшие в ее пределы. Черная дыра содержит материю в границах своей поверхности, но сама не является твердым объектом. Хотя данная материя продолжает падение к центру черной дыры и претерпевает всякого рода сложные трансформации, всего этого сторонний наблюдатель не увидит. Все, что доступно его знанию, – это общая масса материи, а также чистый электрический заряд и момент вращения, что делает черную дыру простейшим объектом во Вселенной. Любые другие объекты, будь то звезды или люди, требуют вычисления бесконечных параметров, если вы хотите уникальным образом описать их. Три определяющих показателя черной дыры не являются неожиданными: это величины, которые сохраняются во всех наблюдаемых физических процессах во Вселенной. Тот факт, что эти величины являются свойствами черных дыр, гарантирует, что они сохраняются во Вселенной. Самое интересное в этой ситуации – огромный список вопросов, остающихся без ответа для стороннего наблюдателя, когда сложная конфигурация вещества оказывается "запертой" за горизонтом. Сторонний наблюдатель не знает, что содержится в черной дыре по ту сторону горизонта – вещество или антивещество, протоны или позитроны, космический мусор или произведения Пруста. Информация, которая

позволила бы разобраться с этими вопросами, просто не проникает за горизонт.

Самая крупная из черных дыр, допускаемых гравитационной теорией Эйнштейна, была обнаружена в начале 1960-х годов. Физики вознамерились понять, какие изменения могут иметь место, когда новое вещество добавляется к черной дыре, или две или более черных дыр сливаются в одну большую. Обнаружился ряд простых правил, которым подчиняются все процессы с участием черных дыр и других форм материи. Гравитационное поле должно быть постоянным вокруг горизонта черной дыры. Общая площадь поверхностностей горизонта, окружающих все участвующие в процессе черные дыры, не может уменьшаться. Любые изменения массы, электрического заряда или момента вращения черной дыры определенным образом связаны между собой. Таким образом, были обнаружены три закона, управляющие изменениями в черных дырах. Но вскоре заметили и нечто необычное. Если просто заменить слова "площадь поверхности" словом "энтропия", а "гравитационное поле" словом "температура", тогда законы перемен в черных дырах превращаются в известные законы термодинамики. Правило, гласящее, что общая площадь поверхностностей горизонта никогда не может уменьшаться в физических процессах, оборачивается вторым началом термодинамики, а требование постоянства гравитационного поля вокруг горизонта – это так называемый нулевой закон термодинамики, гласящий, что в состоянии теплового равновесия температура всюду должна быть одинаковой. Правило, увязывающее между собой дозволенные изменения параметров черной дыры, есть не что иное, как первое начало термодинамики, более известное как закон сохранения энергии.

Поначалу эти удивительные параллели были восприняты как совпадение. Ведь черные дыры по определению не могут иметь температуру, отличную от абсолютного нуля. Ничто не может покинуть ее поверхность, а значит, ее излучение, регистрируемое сторонним наблюдателем, должно равняться нулю. Если поместить черную дыру в ящик рядом с источником тепла, поддерживающим фиксированную температуру, нет смысла надеяться, что они достигнут равновесия при какой-то промежуточной температуре. Нет, черная дыра будет просто "проглатывать" все тепловое излучение, нисколько не нагреваясь.

По этим причинам аналогия с термодинамикой воспринималась многими физиками лишь как любопытное недоразумение. Ведь даже

представить никто не мог, чтобы термодинамика имела что-то общее с законами тяготения, применимыми к сильным гравитационным полям на поверхности горизонта черных дыр. Можно ли придумать что-то менее похожее на тепловой двигатель? И вот в 1974 году Стивен Хокинг сделал потрясающее открытие. Он решил все-таки проверить, что будет, если применить к черным дырам понятия, относящиеся к квантовой механике, и обнаружил, что черные дыры являются не совсем черными. Если говорить о свойствах черных дыр в контексте квантовой механики, существует возможность того, что энергия покидает поверхность черной дыры и регистрируется сторонним наблюдателем. Флуктуации силы гравитационного поля вблизи поверхности горизонта достаточно велики, чтобы спонтанно возникали пары частиц и античастиц. Необходимая для этого энергия забирается из источника гравитационного поля, и по мере продолжения процесса масса черной дыры убывает. Если подождать достаточно долго, она должна полностью исчезнуть, если только на последних стадиях ее существования в происходящее не вмешаются какие-то неизвестные факторы. Это открытие было весьма интересным во многих отношениях, но самым утешительным был тот факт, что частицы, излучаемые с поверхности черной дыры, как выяснилось, обладают всеми характеристиками теплового излучения с температурой, в точности равной гравитационному полю и энтропии на уровне горизонта, как на то указывали аналогии с термодинамикой. Черные дыры действительно обладают ненулевой температурой и подчиняются законам термодинамики, но только тогда, когда в их описании участвует квантовая механика.

Из этого открытия вытекает очень важное следствие: похоже, мы оказались в ситуации, где два разных физических принципа – квантовая механика и общая теория относительности – сходятся и при этом допускают простое термодинамическое описание системы. Мы ожидали, что любые законы, рассматриваемые в таком объединенном квантово-гравитационном контексте, должны быть обязательно чем-то очень сложным и новым для науки. Наверняка во многих ситуациях дело так и обстоит, однако здесь мы наблюдаем, что простые и проверенные временем принципы термодинамики отлично соединяют в себе квантовую механику и теорию относительности. Это не только вселяет надежду, что обращение к простым принципам термодинамики позволит пролить свет на еще более сложные проблемы фундаментальной науки, но и вообще укрепляет веру в термодинамику как парадигму "основного закона", ведающего организацией сложных систем.

На первый взгляд может показаться, что термодинамика является концепцией достаточно ограниченной, поскольку тесно связана с температурой и теплотой. Но применение ее отнюдь не ограничивается вопросами теплообмена. Можно связать понятие энтропии, являющейся мерой беспорядка, с более общим понятием информации, которым мы уже пользовались, обсуждая богатство некоторых систем аксиом и правил логического вывода. Энтропию крупного объекта, такого как черная дыра, можно приравнять числу разных способов, с помощью которых реально переставить наиболее элементарные компоненты так, чтобы состояние объекта в целом оставалось неизменным. Это равносильно числу двоичных цифр (битов), требующих конкретизации во всех деталях внутренней конфигурации компонентов, из которых складывается черная дыра. Кроме того, надо иметь в виду, что, когда формируется горизонт черной дыры, некоторая часть информации для стороннего наблюдателя теряется навсегда. Таким образом, площадь горизонта – энтропия черной дыры – тесно связана с количеством информации, которую утрачивает сторонний наблюдатель, когда вокруг некоторой области Вселенной формируется горизонт и образуется черная дыра.

Успешное открытие термодинамического принципа, связанного с гравитационным полем черной дыры, наводит на мысль, что некий термодинамический аспект присущ гравитационному полю Вселенной в целом. Простейшее предположение, напрашивающееся из примера с черной дырой, – то, что граница видимой Вселенной имеет площадь поверхности. По мере расширения граница раздвигается, и увеличивается доступный нам объем информации о мироздании. Ситуация не кажется многообещающей. Из этого как будто следует лишь то, что Вселенная должна расширяться вечно, потому что, начни она сжиматься, последует уменьшение энтропии, и тогда нарушится второе начало термодинамики. Вселенная может расширяться по-разному, и поверхность границы все равно будет расти. Нужен принцип, который объяснил бы, почему организация мироздания меняется именно так, а не иначе, и Вселенная расширяется столь однородно и изотропно.

Исследование черных дыр имело еще одно интересное последствие: новый фундаментальный принцип, управляющий максимальным информационным содержанием объема пространства. Можно подумать, что максимальное информационное содержание пропорционально самому объему, в противном случае ограничилась бы масса хранилищ памяти. Однако получается, что максимальное информационное содержание

определяется не объемом, а площадью поверхности области пространства, как в случае с черной дырой. Этот голографический принцип, как его назвали, придает площади поверхности области пространства особый статус. По отношению к видимой Вселенной ситуация может оказаться мудреней, чем выглядит на первый взгляд. Не исключено, что трехмерный объем надо понимать, как поверхность четырехмерной области пространства.

Эта соблазнительная связь между максимальным количеством информации, способной храниться в определенной области пространства, и концепцией черных дыр с их термодинамикой пробудила в физиках надежду, что может существовать простая термодинамическая интерпретация "теории всего", которая пробьется через все математические сложности теории струн и поможет отыскать фундаментальную теорию "М".

Стрела времени

Для разных людей время идет по-разному. Я могу вам сказать, для кого оно движется медленно, для кого бежит рысью, для кого скачет галопом и для кого стоит на месте.

Вильям Шекспир*

Одна из трудностей при решении вопроса о существовании законов термодинамического или иного родственного толка связана с давнишней проблемой природы времени. Любой организующий принцип, чтобы быть полезным, должен сообщать что-то о развитии сложной системы с течением времени. Однако есть мнение, что на практике время может быть не чем иным, как непрерывно продолжающимся развитием некоторых формаций. Хотя большинство физиков видят во втором начале термодинамики отражение невероятности некоторых типов начальных условий, есть те, кто

* Перевод В. Левика.

подозревает в нем гораздо более фундаментальную идею, предваряющую сами законы природы. Кроме того, понятие времени становится воистину многозначительным только в тех ситуациях, где имеют место изменения энтропии. Илья Пригожин и Изабелла Стенгерс пишут:

> "Только в том случае, когда система ведет себя достаточно случайным образом, в ее описании возникает различие между прошлым и будущим и, следовательно, необратимость... Стрела времени является проявлением того факта, что будущее не задано, то есть того, что, по словам французского поэта Поля Валери, “время есть конструкция”"*.

Однако даже если сказанное правда, загадки все равно остаются. В целом, законы природы, которые мы думаем, что открыли, обладают свойством обратимости по времени. Это означает, что, если они допускают определенную причинную последовательность событий – историю, – тогда возможен и обратный ход. Несмотря на повсеместность такой ситуации среди физических законов, у природы есть недвусмысленная предрасположенность развиваться только в одном направлении, и никогда в обратном. Подобное иногда называют парадоксом обратимости. Существует множество частных физических феноменов, которые проявляют строгую однонаправленность, или стрелу времени. Часть головоломки заключается в том, чтобы определить, связаны ли между собой отдельные направленности.

Все поля излучения подчиняются законам, которые допускают так называемые опережающие и запаздывающие решения. Последние описывают спонтанную эмиссию волны из источника. Первые – волну, приходящую из будущего, и абсорбируемую источником. В действительности мы наблюдаем только запаздывающие решения математических законов распространения волн. Аналогичным образом вблизи состояния термодинамического равновесия энтропия и сложность с течением времени растут. В равной степени допустимы истории, где энтропия и сложность убывают, но в реальном мире они не наблюдаются. Наконец – и это тоже немаловажно, – человек психологически чувствует время. Мы помним только то, что называем прошлым. И этим оно четко отличается от будущего.

* Перевод Ю. Данилова.

Хотелось бы знать, связаны ли частные случаи однонаправленности между собой и с глобальной стрелой времени, задаваемой расширением Вселенной. Некогда книга Стивена Хокинга "Краткая история времени" имела огромную популярность. В ней автор приходит к выводу, что психологическая и термодинамическая стрелы идентичны, поскольку мозг человека, по сути, является счетной машиной, а процесс вычисления необратим. Этот тезис строится на предположении (с которым многим не очень хочется соглашаться), что мозг – не более чем компьютер, выполняющий логические операции, а что до вычислений, то они необратимы по термодинамическим резонам. Следовательно, мыслительные процессы обладают стрелой времени, обусловленной термодинамикой. Этот аргумент неубедителен, потому что на самом деле, как показывает теория вычислительных машин, процесс абстрактных вычислений не является логически необратимым. Обычная операция сложения действительно необратима (3 + 3 однозначно равно 6, но 6 можно получить и за счет сложения других чисел: 3 + 3; 4 + 2; 5+1; 6 + 0), как и стандартные логические операции "И/ИЛИ", однако существует возможность построения обратимых логических вентилей. Вычисления с использованием так называемых вентилей Фредкина являются логически обратимыми, и в идеале второй закон термодинамики не отдает предпочтения ни одному из возможных направлений. Это не подтверждает, однако, что термодинамические стрелы не идентичны; ясно лишь то, что данная конкретная попытка доказательства их идентичности не удалась.

Далеко от равновесия

Здесь, в полосе прибоя,
На песке меж землей и морем,
Что мне написать, что построить
До наступления ночи?
Какие вырезать руны,
Чтоб натиск волны сдержали,
Какую крепость построить,
Чтоб дольше меня простояла?

А. Э. Хаусман

Знаменитый детективный роман Дороти Сейерс "Разыскивается труп" из серии "Питер Вимси" впервые опубликовали в 1932 году – в то самое время, когда второе начало термодинамики было особенно в моде среди интеллектуалов. После обнаружения трупа жиголо на уединенном английском пляже Вимси выслушивает показания многочисленных свидетелей и подозреваемых. Когда очередь доходит до Ольги Кон, она, уловив скепсис в голосе Вимси, спрашивает:

– Вы мне не верите?

– Я вам верю, мисс Кон, – торжественно заявил Вимси, – так же непоколебимо, как верю во второй закон термодинамики.

– О чем это вы? – подозрительно спросил мистер Симс.

– Второй закон термодинамики, – с готовностью пояснил Вимси, – это то, что удерживает мир на его путях, и то, без чего время побежало бы назад, как фильм, пущенный в обратную сторону.

– Неужели? – взволнованно воскликнула мисс Кон.

– Престолы могут зашататься, – сказал Вимси, – мистер Томас может отказаться от своего вечного костюма, а мистер Сноуден отречься от принципов свободной торговли, но второй закон термодинамики будет продолжать делать свое дело, пока гнездится память в несчастном этом шаре, под которым Гамлет подразумевал свою голову, а я, привыкший мыслить шире, подразумеваю планету, где мы имеем удовольствие обитать. Инспектор Ампелти, кажется, шокирован, но уверяю вас, что я не знаю более впечатляющего способа

выразить всю мою веру в вашу абсолютную искренность. – Он усмехнулся. – В ваших показаниях, мисс Кон, мне больше всего нравится то, что они окончательно и бесповоротно запутывают проблему, которую мы с инспектором взялись решить. Благодаря вашим показаниям вся проблема представляется конечной квинтэссенцией непостижимой бессмыслицы. Следовательно, в соответствии со вторым началом термодинамики, которое гласит, что мы час за часом и секунда за секундой продвигаемся к состоянию все большего беспорядка и случайности, нами получены утешающие свидетельства того, что мы счастливо и верно продвигаемся в правильном направлении.

В этом диалоге есть несколько интересных интерпретаций второго начала. Оно воспринимается как настоящий закон, который "удерживает мир на его путях", а не как следствие особого выбора начальных условий (мы обсуждали это в главе 3). Больший интерес представляет предположение, что время побежало бы вспять, если бы данный закон перестал действовать. То есть требование неубывания энтропии представляется настолько неодолимым, что допустить другую возможность – убывание – можно только в том случае, если развернется стрела времени. Еще в диалоге упоминается представление о том, что второй закон требует, чтобы все сущее, хочешь не хочешь, двигалось в направлении большего беспорядка. Поэтому растущая путаница в показаниях свидетелей даже радуют Вимси. Однако интересно, что он скажет, когда все наконец выяснится и из массы противоречивых показаний последует упорядоченный вывод?

Термодинамический курс на беспорядок на первый взгляд противоречит многим сложным явлениям, которые мы наблюдаем вокруг. Очевидно, что некоторые из них со временем усложняются и становятся более упорядоченными: когда делаем уборку в доме, собираем радиоприемник из множества разрозненных деталей, когда с заводского конвейера сходит новенький автомобиль, простые формы жизни эволюционируют, становясь все более сложными. Все эти процессы свидетельствуют о возможности перехода из относительного хаоса в состояние упорядоченности.

Во многих таких случаях мы должны обращать самое пристальное внимание на все формы порядка и беспорядка, присутствующие в рассматриваемой ситуации. Так, уборка помещения требует определенных физических усилий. Это приводит к тому, что упорядоченная биохимическая

энергия, хранящаяся в организме в форме крахмалов и сахаров, расщепляется и преобразуется в тепло. Если занести эту деградацию энергии на счет энтропии, это более чем компенсирует убывание беспорядка, связанное с уборкой.

Однако, когда система далека от состояния теплового равновесия, свою роль играет еще один нюанс. Наши интуитивные представления о том, что является "вероятным", обусловлены жизненным опытом, а ориентируясь на него, мы знаем, что происходит в ситуациях, очень близких к состоянию теплового равновесия. Когда же до последнего далеко, возможны весьма необычные вещи, то есть кажущиеся нам немыслимыми с позиций привычного гауссовского закона распределения вероятностей. Изучение систем, далеких от теплового равновесия, пребывает еще в зачаточном состоянии. Мы еще плохо представляем себе, что может происходить, а что нет в сложных природных явлениях и какие маловероятные события дадут о себе знать в течение времени. "Теория всего" сама по себе не в состоянии объяснить, какие типы сложных организованных систем могут существовать в природе. Слишком многое зависит от того, из каких компонентов они сложены и какова их история. Возможно, они подчиняются еще не открытым нами общим правилам эволюции, отличным от известных физических законов и диктующим развитие любых форм сложности. "Теория всего" едва ли сообщит что-то интересное по таким вопросам, как происхождение жизни и разума. В кладовой чудес они располагаются на разных полках.

Стремясь к более глубокому пониманию развития организованных сложных систем, ученые начали использовать термин "возникновение" для описания ситуации, где из простых "кирпичиков" складывается значительная степень порядка непредсказуемым на уровне кирпичиков образом. Из двух атомов водорода и атома кислорода состоит молекула воды, но этого описания недостаточно для того, чтобы предвидеть существование водопадов и ледников. Природа как будто создает лестницу возрастающей сложности, каждая следующая ступенька которой не сводится целиком и полностью к нижним. Все самые интересные структуры вокруг нас являются такими. Физиологический состав отдельно взятого человека – это вопрос сначала для биохимика, а потом для физиолога. Затем потребуется помощь нейрофизиолога и психолога. Но если мы рассматриваем группу людей, понадобятся консультации социолога, экономиста и политика. А потом возникнет нужда в присутствии богослова, художника и музыканта. На каждой стадии верхний слой сложности нововведения никак не объясняется нижними. Когда мы поднимаемся на верхние уровни, то сталкиваемся с

разнообразием описаний, которые отличаются друг от друга, но по-своему самодостаточны. О компьютерном дисплее можно рассказать на языке электроники, не упоминая о программном обеспечении, с помощью которого был создан документ, отображенный на экране. Описание программного обеспечения признается полным, даже если в нем не говорится о том, каким образом наблюдаемое изображение появляется на экране с технической точки зрения. Эти формы содержания дополняют друг друга, и в примере с дисплеем их не перепутаешь. Но когда речь заходит о "смысле" Вселенной и о совместимости наших представлений о ее структуре и эволюции с другими попытками понять значение человеческой этики и религиозных убеждений, о разнице категорий зачастую забывают, пытаясь перенести понимание об одном уровне на другой.

Пески времени

Скитальцы не все пропадают.

Дж. Р. Толкиен

Существует ли возможность открывать глубинные тайны Вселенной, наблюдая за самыми обыденными вещами? Или для того, чтобы совершать фундаментальные открытия, обязательно требуются миллионы фунтов, долларов и евро, целые армии научных сотрудников, гигантские коллайдеры и телескопы, огромные батареи компьютеров и флотилии космических спутников? На большинстве направлений фундаментальная наука является достаточно капиталоемкой. Но есть красивые исключения. Один из самых впечатляющих примеров связан с простейшим процессом. Наверное, всем его случалось наблюдать. Он стал парадигмой развития сложных систем, которые, как кажется, сами организуются из беспорядка.

Создайте горку песка путем свободного падения песчинок на плоскую поверхность, например, на стол. Куча постепенно нарастает и становится круче. Песок то и дело осыпается сверху лавинами. Поначалу падающие сверху песчинки далеко от места падения не разбегаются, но по мере того, как крутизна горки возрастает, мощность лавин увеличивается. А потом происходит нечто странное: она перестает увеличиваться. Когда достигнута

критическая крутизна склона, любая добавленная порция песка сразу же компенсируется лавинами и угол обрыва остается прежним. После того как песок заполнит всю поверхность стола, куча больше не растет: сколько добавляется сверху, столько же осыпается вниз со стола. После этого горка сохраняет неизменную форму, когда песчинки в ней непрерывно обновляются: получается что-то вроде спокойного течения реки (рисунок 7.5).

Произошла замечательная вещь. Каждая из падающих песчинок движется по хаотически-чувствительной траектории, в том смысле, что любое взаимодействие с другими песчинками способно вызывать катастрофические изменения – вплоть до обрушения всего склона. Однако конечным результатом всех этих преобразований является высокоорганизованная куча песка с определенной крутизной склона, которая зависит только от степени гладкости песчинок. Самое странное – организованность достигается за счет неустойчивости – лавин, которые могут иметь самую разную величину – от падения одной песчинки до обрушения всего склона.

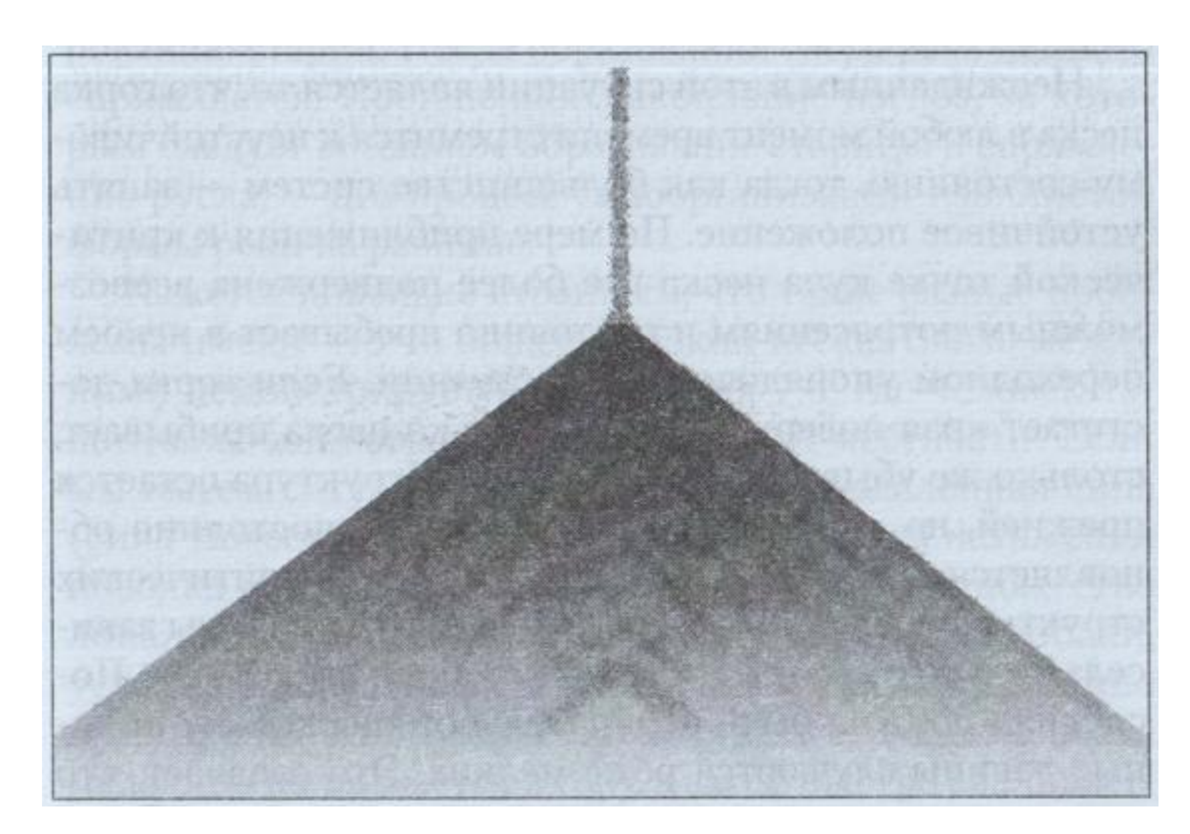


Рисунок 7.5. Песчинки, падающие на плоскую поверхность, образуют горку с определенной крутизной. Эта критическая крутизна поддерживается осыпанием песка.

Пер Бак, Чао Танг и Курт Визенфельд, изучавшие этот феномен в 1987 году, назвали его самоорганизацией критического состояния. Под

самоорганизацией понимается процесс превращения хаотически падающего песка в упорядоченную горку. А критическим называется то шаткое состояние, в которое куча песка приходит, когда достигает определенной крутизны. В этом состоянии в любой момент времени можно ожидать лавину на том или другом склоне горки. Цепочка событий, обеспечивающая сохранение данного состояния, следующая: в каком-то месте медленно и локально накапливаются песчинки, затем происходит обрушение, потом снова медленное накопление и внезапное обрушение и т. д. Когда в результате локального накопления песка крутизна превышает критическую, происходит обрушение. Таким образом, общая устойчивость обеспечивается локальной неустойчивостью.

Неожиданным в этой ситуации является то, что горка песка в любой момент времени стремится к неустойчивому состоянию, тогда как большинство систем – занять устойчивое положение. По мере приближения к критической точке куча песка все более подвержена всевозможным потрясениям и постоянно пребывает в некоем переходном упорядоченном состоянии. Если горка достигает края поверхности, то сколько песка прибывает, столько же убывает, падая со стола. Структура остается прежней, но "личный состав" песчинок постоянно обновляется. Для возникновения такого типа критических структур необходимо лишь, чтобы частота лавины зависела только от математической степени ее размера. Последняя должна быть отрицательной, поскольку крупные лавины случаются реже мелких. Это означает, что никакого предпочтительного размера лавины нет. Ситуация будет иной, если песок клейкий и имеет свойство образовывать комья, которые просто скатываются по склону. При более пристальном рассмотрении можно увидеть, что лавины из песчинок асимметричной формы, таких как зерна риса, демонстрируют даже большую независимость от критического масштаба, поскольку зерна риса при падении скорее кувыркаются, чем скользят.

Поначалу исследователи надеялись, что самоорганизация горки песка может послужить парадигмой развития большинства типов организованной сложности. Но надежды не оправдались. Однако польза от этого исследования все-таки есть, поскольку оно содержит ключи к тому, как организуются многие сложные системы. Лавины песка могут олицетворять исчезновение видов в экологическом балансе, пробки в дорожном движении, банкротства предприятий в экономической системе, землетрясения или извержения вулканов в модели равновесного давления в земной коре и даже формирование старичных озер извилистой рекой. На изгибах реки вода бежит быстрее, подмывая берег, что приводит к

формированию стариц. После образования озера река немного спрямляется. Постепенное накопление изгиба, за которым следует внезапное образование старицы и спрямление русла, – это процесс самоорганизации извилистой формы реки на равнине.

Кажется довольно странным, что такие разные проблемы имеют что-то общее с горкой песка. Связь между ними демонстрирует иллюстрация 7.6, где человек тащит за собой собаку по пересеченной местности. Если мы имеем ситуацию, где действует определенная сила (сила тяжести в примере с песком или сила натяжения поводка в примере с собакой) и существует множество локальных состояний равновесия (ямы для собаки, устойчивые локальные холмики для песка), тогда можно представить, что будет, если натянуть поводок. Собака медленно поднимается в гору, а затем быстро сваливается с верхушки в очередную яму, снова карабкается на очередную горку и прыгает вниз... Этот рваный ритм, где медленный подъем раз за разом сменяется резкими скачками, характерен и для кучи песка, где медленный процесс накопления песчинок то и дело прерывается лавинами. Оказывается, такое поведение характерно для любой системы, состоящей из очень простых ингредиентов.

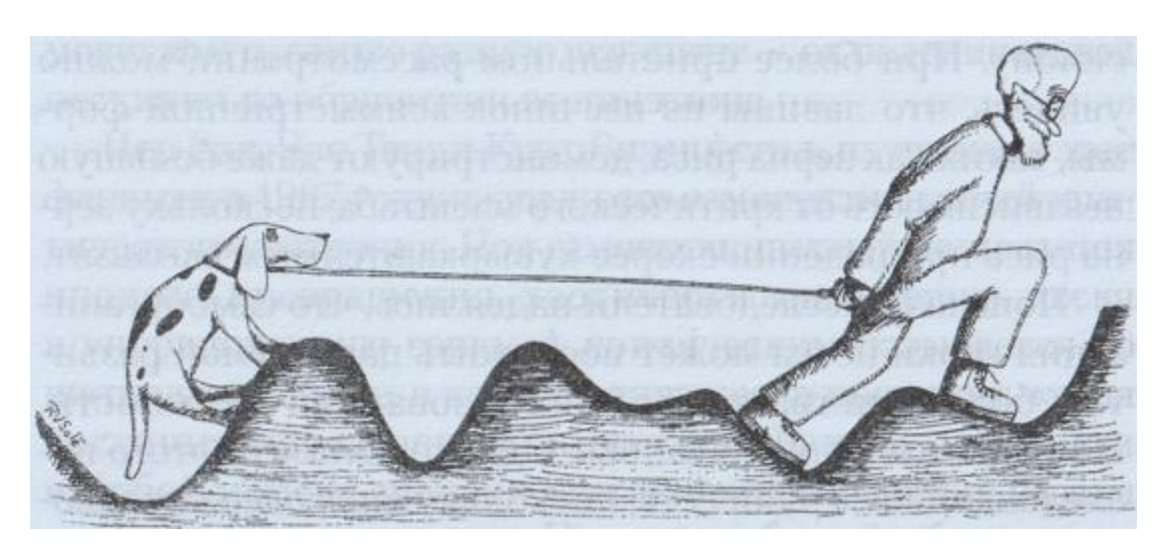


Рисунок 7.6. Реальная система может иметь множество потенциальных локальных состояний равновесия, и действующая сила проявляется в том, что медленные подъемы чередуются с резкими скачками.

Это исследование показывает, что все-таки можно делать важные открытия, наблюдая за повседневными вещами и задавая правильные вопросы.

Путь мира

Я сознаю, что этот трактат наверняка может вызвать порицание как излишний, и я виноват перед читателем за то, что без необходимости отнимаю у него время, учитывая, как много уже написано на эту тему самыми учеными людьми нашего времени.

Джон Рей

До сих пор без ответа остается важный вопрос о существовании какого-то еще не открытого организующего принципа, который дополняет известные законы природы и диктует общий ход эволюции Вселенной. Чтобы действительно дополнить то, что мы уже знаем о физических законах, этот принцип должен отличаться от любых законов гравитации и элементарных частиц, которые могут найти свое место в окончательной версии какой-нибудь "теории всего". Он должен быть применим не конкретно ко вселенным, но управлять эволюцией любой сложной системы. Его общим понятиям следует быть каким-то образом подстроенными под представления, характеризующие конкретные вещи, наблюдаемые в развивающейся Вселенной, – концентрация вещества в звездах и галактиках, преобразование материи в излучение. Однако ему должны подчиняться и те невидимые пути, по которым может меняться гравитационное поле Вселенной. Любое открытие такого рода было бы очень интересным, потому что наша Вселенная выглядит гораздо более упорядоченной, чем есть основания ожидать. У нее крошечный уровень энтропии в сравнении с тем, какой мог быть, если реорганизовать наблюдаемую материю в другие конфигурации. Подразумевается, что в начале расширения Вселенной он был поразительно маленьким, а это требует весьма специфических начальных условий. Но, возможно, такой вывод уж слишком прост. Во время обсуждения инфляции, имевшей место в первые мгновения существования Вселенной, мы видели, что наблюдаемая часть мира отражает начальные условия лишь очень маленькой области Вселенной. Поэтому мы не можем делать какие-то выводы насчет энтропии Вселенной в целом. Более того, вполне реально, что само это понятие окажется бессмыслицей, если Вселенная бесконечна в своей протяженности. А инфляционная модель заставляет думать, что за пределами видимой Вселенной порядка гораздо

меньше. С термодинамической точки зрения наблюдаемая часть Вселенной может оказаться флуктуацией.

В отношении энтропии Вселенной есть еще один любопытный момент, связанный с традиционной картиной тепловой смерти, которая якобы реальна в отдаленном будущем, когда температура во всей Вселенной сравняется, после чего уже никакие события не смогут происходить. Однако ситуация несколько сложнее. Складывается впечатление, что, хотя энтропия в наблюдаемой части Вселенной возрастает и можно предвидеть процессы, которые обеспечат неуклонный рост энтропии и в будущем, на самом деле он сильно отстает от того теоретического максимума, которым видимая Вселенная могла бы обладать к настоящему времени.

Фрэнк Типлер и автор этой книги изучили возможные сценарии развития событий для крупномасштабной структуры Вселенной в свете известных физических принципов. Нас интересовало, возможно ли существование каких-то форм жизни во всех будущих временах. Чтобы дать сколько-нибудь существенный ответ, вопрос каким-то образом нужно упростить, привести в удобоваримую форму. Мы не знаем всех атрибутов жизни, поэтому сосредоточимся на минимальных требованиях, необходимых для существования интеллекта. Практически должна иметься возможность обработки информации, а для этого требуется некая форма термодинамического неравновесия. Тогда можно показать, что нет известных препятствий, способных помешать обработчикам информации подходящего типа продолжать делать это во всех будущих временах. Проще говоря, они могут неограниченно долго обрабатывать бесконечный объем информации. Разумеется, это не значит, что так будет или подобные устройства должны обладать какими-то другими характеристиками, присущими живым существам. Наша цель – показать, что нет препятствий для продолжения данного процесса в будущем, и в частности ее не остановит широко разрекламированная популяризаторами науки тепловая смерть Вселенной. Это важный аспект так называемого финального антропного принципа, или, правильнее сказать, финальной антропной гипотезы. Речь не идет о какой-то философской спекуляции, а о свойстве, которым Вселенная либо обладает, либо нет. Можно предположить, что, если будет открыт некий великий принцип, управляющий общим развитием организованных сложных систем во всей Вселенной, тогда ответ на финальную антропную гипотезу будет частью его. Искомый кандидат – например, какая-то мера производительности обработки информации, а также алгоритмической сложности и глубины данных. Действительно, эти

концепции имеют много привлекательных черт. Случайность в расширяющейся Вселенной не является фиксированной. По мере роста сведений, сложности естественных информационных процессоров и развития производительности определение того, что следует считать случайностью, тоже будет трансформироваться.

Если рассматривать Вселенную как огромный компьютер, обработчик информации, генератор энтропии, тогда легко можно представить законы природы в виде программного обеспечения, которое управляет конкретными формами материи, формирующими мир струн и элементарных частиц. Истинная унификация этих понятий в том смысле, в каком говорилось о ней в предыдущих главах, сводится в данном случае к программному обеспечению, которое настроено на предельно конкретное аппаратное обеспечение. Такие программы легко себе представить. Многие из моторных функций человека (например, движения руками или ногами) напрямую подчиняются командам мозговых подпрограмм. Начальные условия можно уподобить исходным данным. Если они должны иметь какие-то специальные формы, нерасторжимо связанные с физическими законами и частицами материи, то потребуется, чтобы универсальные программы работали только с определенными начальными конфигурациями. По-видимому, "теория всего" должна пролить свет на концепцию и возможности такого абстрактного компьютера.

Тепловая смерть Вселенной стала пессимистическим следствием викторианского термодинамического взгляда на Вселенную как на огромную машину, которая неизбежно должна скатываться в состояние все большего беспорядка и скучного равновесия, где ничего не происходит. Расширение Вселенной дало нам надежду на спасение. Закрытое мироздание, на всех порах несущееся к коллапсу (большому сжатию), обречено на конечную историю, если только его обитатели не найдут способы преобразовывать энергию. Если это удастся, они смогут жить бесконечно долго в своем субъективном времени, но будут иметь очень узкий диапазон возможных действий. Что же касается Вселенной, которая расширяется, – а наша, видимо, такова, – то у нее потенциально много судеб. Модель простейшего типа – вечное расширение с замедлением – имеет возможность избежать простой тепловой смерти. Даже несмотря на то, что энтропия всегда должна возрастать, выясняется, что наша Вселенная все больше отстает от того максимального ее уровня, который теоретически реален на данный момент времени. Максимально допустимая энтропия возрастает быстрее, чем существующая. Получается, что она растет, а мы все больше удаляемся от

состояния равновесия. Однако есть данные, что путь развития нашей Вселенной не таков. Открытие того обстоятельства, что несколько миллиардов лет назад расширение Вселенной начало ускоряться, многое меняет. Ускорение означает, что реальная энтропия может догнать максимально допустимую. И когда это случится, наступит тепловая смерть. Наша единственная надежда заключается в том, что мы населяем такую область Вселенной, которая не участвует в ускоренном расширении. Но даже если такое положение вещей будет сохраняться какое-то время, вечность – слишком долгий срок, так что со временем все неоднородности выровняются, сгладятся, и Вселенная превратится в абсолютно однородную безжизненную пустыню.

Глава 8

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ОТБОРА

Не кусай мой палец – посмотри, куда он показывает.

Уоррен Маккаллох

Вездесущие ошибки

Тот, кто не знает, и не знает, что не знает, – глупец.
Сторонись его.
Тот, кто не знает, и знает, что не знает, – дитя.
Научи его.
Тот, кто знает, и не знает, что знает, спит.
Разбуди его.
Тот, кто знает, и знает, что знает, – мудрец.
Следуй за ним.

Арабская мудрость

Никакая наука не может основываться на одних только наблюдениях. Мы не понимали бы ни того, что именно имеет место, ни того, как на наше видение влияет предвзятость, склонность более охотно замечать одни свидетельства, нежели другие. Поэтому хороший экспериментатор отличается не только сноровкой и умелыми руками, но также способностью понимать и максимально предвидеть любые погрешности, присущие различным типам эксперимента и наблюдений, которые он использует.

Такого рода погрешности играют критически важную роль в понимании мироздания как целого. Игнорирующая их "теория всего" не сможет обеспечить точную корреляцию между предсказаниями и тем, что

мы наблюдаем. Полное постижение процессов Вселенной требует принимать в расчет ошибки, вызванные самим фактом наблюдения.

Ученым знакомы два типа ошибок эксперимента, которые, впрочем, не имеют отношения к обыденному пониманию этого слова. Первый тип связан с ограниченной точностью измерений. Такие погрешности в какой-то мере всегда имеют место, и ученые стараются их минимизировать. Ошибки второго типа – систематические – являются более тонкими, и их не всегда удается избежать. Любая научная процедура имеет свойство искажать результаты в ту или другую сторону. В лабораторных экспериментах есть возможность повторить опыт, изменяя те или иные внешние условия, чтобы проверить, нет ли зависимости результатов эксперимента от каких-то из этих установок. Ученые предпочитают, чтобы важные открытия подтверждались хотя бы двумя независимыми друг от друга экспериментами – по той простой причине, что каждый из них имеет свои систематические ошибки, но они не бывают совершенно идентичными. Однако в астрономии таких возможностей зачастую нет. Мы можем наблюдать Вселенную, но не в силах менять ее конфигурацию и проводить над нею цепочки контролируемых экспериментов. У нас нет возможности провести все мыслимые опыты и собрать данные. Поэтому надлежит особенно остерегаться всякого рода систематических ошибок. Например, если бы нам поручили составить обзор всех видимых галактик с целью определения их относительной яркости, нам неизбежно пришлось бы иметь дело со встроенной в саму постановку вопроса систематической ошибкой, вызванной предпочтением к поиску более ярких галактик по сравнению с более тусклыми.

В космологии такого рода ошибки отбора вездесущи, и признание этого факта лежит в основе так называемого слабого антропного принципа. Полезнее всего рассматривать его как принятие того обстоятельства, что само наше существование требует выполнения определенных необходимых условий в отношении прошлой и настоящей структуры видимой Вселенной. Наши наблюдения следует рассматривать не с точки зрения ничем не ограниченного числа потенциальных возможностей, но с позиции некоего подмножества вероятностей, отвечающих необходимым условиям для возникновения (прежде чем звезды погаснут) углеродной формы жизни и наблюдателей вроде нас. Космологи видят в слабом антропном принципе поправку к знаменитому тезису Коперника, что человек не занимает во Вселенной какое-то привилегированное место. Хотя действительно неверно выделять наше положение как особое во всех отношениях, не стоит из этого делать вывод, что оно не может быть исключительным в каких-то

отношениях. Мы не могли существовать внутри звезды, или, когда Вселенной было меньше миллиона лет и температуры были таковы, что любая молекула и атом тут же распались бы на элементарные частицы. Если бы у Вселенной был центр (а на его наличие ничто не указывает) и в его окрестностях имели место соблазнительные для эволюции и жизни условия, тогда мы не должны были бы удивляться, обнаружив себя там. Одна из самых важных черт слабого антропного принципа состоит в том, что пренебрежение им неминуемо приводит к ошибочным выводам относительно структуры Вселенной. Самый известный пример – ошибка Дирака, который в свое время предложил внести весьма радикальные изменения в закон тяготения с целью объяснить числовые совпадения между величиной физических констант и возрастом Вселенной, совершенно не учтя то обстоятельство, что это совпадение является необходимым условием нашего собственного существования.

Некогда предполагалось, что Вселенная существует в рамках неизменного фонового пространства, в котором происходят все наблюдаемые движения небесных тел. В дальнейшем выяснилось, что никакой статичной космической "сцены" нет. Все, что существует, пребывает в состоянии вечного движения. Вселенная расширяется: скопления галактик разбегаются друг от друга со скоростью, которая возрастает пропорционально расстоянию между ними. Это космическое расширение открылось нам благодаря устойчивому красному смещению света, приходящего от удаленных источников.

Если экстраполировать расширение обратно по времени, можно представить себе, как оно начиналось примерно 15 миллиардов лет назад, когда все расстояния были нулевыми. Современные космологические исследования сосредоточены на событиях, имевших место в первую долю секунды после предполагаемого начала. В такие мгновения Вселенная напоминала космический эксперимент физики высоких энергий, последствия которого позволяют частично реконструировать его ход.

Над вопросом места человека в безличном гобелене космического пространства и времени ломали головы мистики, философы, теологи и естествоведы всех времен. Разброс мнений – огромный. На одном краю рисуется гнетущая материалистическая картина человеческой жизни как локальной случайности, побочного явления, совершенно не связанного с неизбежным общим ходом эволюции Вселенной от Большого взрыва до большого сжатия или вечного забвения тепловой смерти. На другом конце

спектра проповедуется традиционный телеологический взгляд, что мироздание имеет некий глубинный смысл и частью его являемся мы. Если стать на эту оптимистическую точку зрения, не приходится удивляться тому, что местная среда так хорошо подогнана под наши потребности. Данного взгляда придерживались многие биологи, пока Чарльз Дарвин и Альфред Рассел Уоллес в середине XIX века не опубликовали результаты своих наблюдений и выводы насчет эволюционной адаптации живых организмов к окружающей среде. С тех пор биологи отвергают любые идеи целенаправленности эволюции. Если природные условия вдруг изменятся каким-то необычным образом, так что интеллект станет не подспорьем, а помехой, мы совершим разворот и по тем же следам вернемся в эпоху динозавров.

Космология не в состоянии сказать ничего интересного по поводу детального устройства и эволюции земной жизни, но есть любопытная информация насчет необходимых предпосылок земной жизни. Возьмем простой, но показательный пример. Видимая Вселенная имеет в поперечнике примерно 15 миллиардов световых лет. В ней не менее 100 миллиардов галактик, каждая из которых содержит около 100 миллиардов звезд, подобных Солнцу. Почему же Вселенная такая большая?

Живые системы Земли базируются на особых химических свойствах углерода и его взаимодействиях с водородом, азотом, фосфором и кислородом. Эти "биологические" элементы (а также высокочтимые альтернативы типа кремния) вышли не из ада Большого взрыва. Они являются продуктами ядерных реакций, происходящих внутри звезд. В процессе ядерного синтеза первобытные ядра водорода и гелия в них переплавляются в более тяжелые элементы. Достигнув конца жизненного цикла, эти звезды взрываются, и вышеназванные элементы рассеиваются в космическом пространстве, где складываются в молекулы, попадают на планеты, а потом оказываются в организме людей. Почти все атомы углерода, находящиеся в теле человека, являются участниками этой драматической звездной истории. Природный процесс производства биологических строительных блоков жизни из инертных реликтов Большого взрыва является долгим и медленным по земным меркам. Он занимает более 10 миллиардов лет. Этот продолжительный период звездной алхимии необходим для создания предшественников жизни. Поскольку Вселенная расширяется, мы теперь понимаем, почему она должна иметь размер не менее 10 миллиардов световых лет. Вселенная размером с нашу Галактику была бы достаточно велика, чтобы уместить сотню миллиардов звезд, но она

насчитывала бы всего лишь месяц от роду. В истории мироздания есть ниша, когда жизнь могла самопроизвольно возникнуть и развиться, и это действительно случилось. Этот временной диапазон, с одной стороны, ограничен требованием, чтобы Вселенная успела достаточно остыть после Большого взрыва и сформировались звезды, атомы и биомолекулы, а с другой – тем фактом, что все звезды за 100 миллиардов лет должны выгореть (см. рисунок 8.1а).

Простой урок, вытекающий из этого примера, состоит в том, что крупномасштабная структура Вселенной неожиданным образом оказывается связана теми же условиями, которые необходимы для существования в ней живых наблюдателей. Когда космологи наталкиваются на какие-то необыкновенные свойства Вселенной, они должны не изумляться, а задуматься над тем, смог ли кто-то вообще удивляться, если бы свойства Вселенной были существенно другими. Такого типа "слабое антропное" соображение не является фальсифицируемой гипотезой или теорией. Это пример методологического принципа, который, если его проигнорировать, приведет к неправильной трактовке подручных данных.

Последствия игнорирования этого принципа будут зависеть от базовой структуры Вселенной. Если в ней действительно существуют по-настоящему случайные элементы, то роль ошибок становится критически важной для нашей программы познания физического мира. Если же структура Вселенной является необходимой и единственно возможной, то мы вынуждены довольствоваться выводом, что нам просто крупно повезло, что Вселенная оказалось такой, в которой возможна жизнь. Однако из нашего обсуждения роли нарушений симметрии в природе мы знаем, что Вселенная, похоже, не такая. В ней есть аспекты, которые вполне могли бы быть (и даже могут быть) другими в каких-то ее удаленных частях. Кроме того, мы видели, что многие физические константы своими величинами обязаны квазислучайным процессам, имевшим место на ранних стадиях развития Вселенной. В таких обстоятельствах было бы большой ошибкой ожидать, что предсказания наиболее вероятной Вселенной, вытекающие из "теории всего", должны обязательно соответствовать тому миру, который мы видим вокруг себя.

Ранее уже говорилось, что в контролируемых лабораторных экспериментах мы имеем возможность повторять опыты, меняя различные условия. Благодаря этому зачастую бывает легко разобраться, какие феномены внутренне присущи законам природы, а какие являются лишь последствиями неких случайных нарушений симметрии в ту или другую

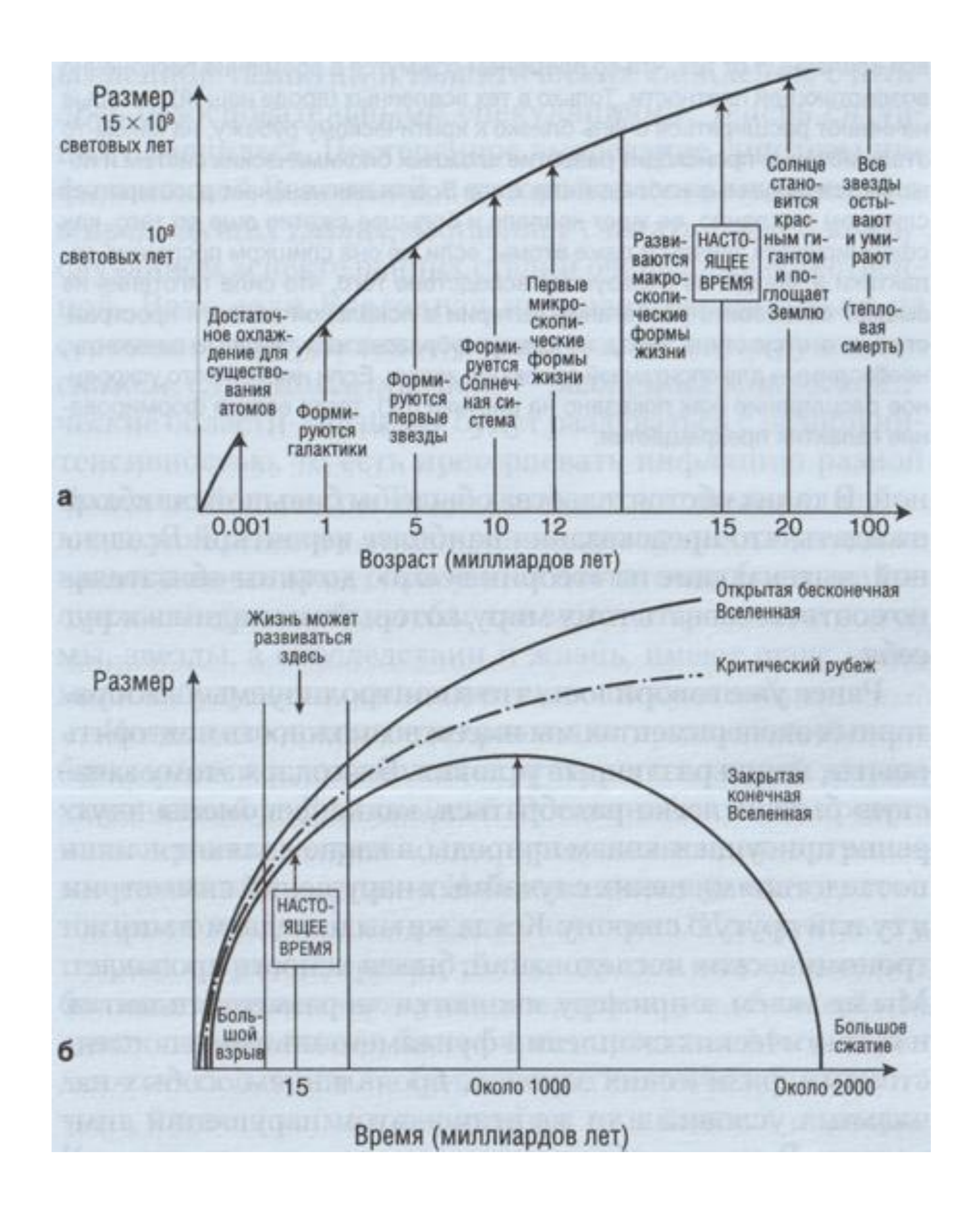


Рисунок 8.1. (а) – характерные эпохи космической истории Вселенной, вечно расширяющейся без ускорения. Расширение означает, что внешние условия плотности и температуры со временем постоянно меняются. Только по истечении существенных периодов времени Вселенная достаточно остывает, чтобы могли сформироваться сначала атомы, затем молекулы, потом звезды, планеты и, наконец, жизнь. В будущем мы предвидим эпоху, когда ядерное топливо звезд истощится. Если углеродные формы жизни не разовьются в указанный промежуток времени, они не разовьются никогда; (б) – расширение нашей Вселенной очень близко соответствует критическому рубежу, который отделяет вечно расширяющиеся вселенные от тех, что со временем сожмутся в состояние бесконечно возрастающей плотности. Только в тех вселенных (вроде нашей), которые начинают расширяться очень близко к критическому рубежу, на каком-то этапе истории происходит развитие сложных биохимических систем и появляются разумные наблюдатели. Если Вселенная начинает расширяться слишком медленно, ее ждет коллапс и большое сжатие еще до того, как сформируются звезды и даже атомы; если же она слишком поспешит, галактики и звезды не образуются вследствие того, что сила тяготения не сможет остановить разбегание материи в локальной области пространства, а в отсутствие звезд не смогут образоваться тяжелые элементы, необходимые для спонтанной эволюции жизни. Если имеет место ускоренное расширение (как показано на рисунке 5.2), тогда всякое формирование галактик прекращается.

сторону. Когда же мы попадаем в мир астрономических исследований, былая ясность пропадает. Мы не знаем, к примеру, являются ли размеры галактик и галактических скоплений фундаментальными последствиями физических законов, проявлением особых начальных условий или же результатом нарушений симметрии. В данных обстоятельствах единственная замена чистому эксперименту – это составление каталогов всех наблюдаемых свойств схожих объектов, а затем поиск корреляций между разными величинами. Таким образом можно выявить тенденции: увидеть, например, все ли крупные галактики являются яркими, а магнитные звезды медленно вращаются и т. д.

До недавнего времени влияние случайных нарушений симметрии на наблюдаемую структуру астрономической вселенной галактик и галактических скоплений считалось безосновательными спекуляциями. Теперь ситуация изменилась. Постепенное вызревание гипотезы инфляционной Вселенной, с которой мы уже знакомились в предыдущих главах, заставляет считать идею о квазислучайном аспекте ранних стадий очень даже естественной. Ведь если Вселенная начинает расширяться из состояния, где условия в разных частях варьируются – скажем, случайным образом, – различные микроскопические области-"пузыри" будут раздуваться с разной интенсивностью, то есть претерпевать инфляцию разной продолжительности. Только те места, которые подвергаются ускоренному расширению довольно длительное время и из которых образуются достаточно большие космические регионы, чтобы там могли образоваться атомы, звезды, а впоследствии и жизнь, имеют шанс стать местом будущих космологических спекуляций.

Когда дело доходит до сравнения предсказаний с наблюдениями и понимания структуры с позиций теории хаотической инфляционной Вселенной, нужно принимать в расчет погрешности, присущие нашим астрономическим наблюдениям. Наблюдения могут иметь место только во вселенных определенного типа. Исключить эту теорию из рассмотрения только на том основании, что большинство подвергнувшихся инфляции областей являются крошечными, было бы не оправдано. Мы вынуждены жить в одном из больших регионов независимо от того, насколько маловероятным он является априори. Кроме того, если мироздание пространственно бесконечно, тогда экстраполяции наблюдений, осуществляемых в пределах частного обитаемого "пузыря", на Вселенную в целом сильно зависят от не поддающихся проверке предположений в

отношении природы ее регионов, находящихся за горизонтом видимости (см. рисунок 8.2).

Советский физик Андрей Линде в свое время предложил усовершенствованный вариант, где процесс инфляции сам себя поддерживает и увековечивает. Каждая раздувающаяся микроскопическая

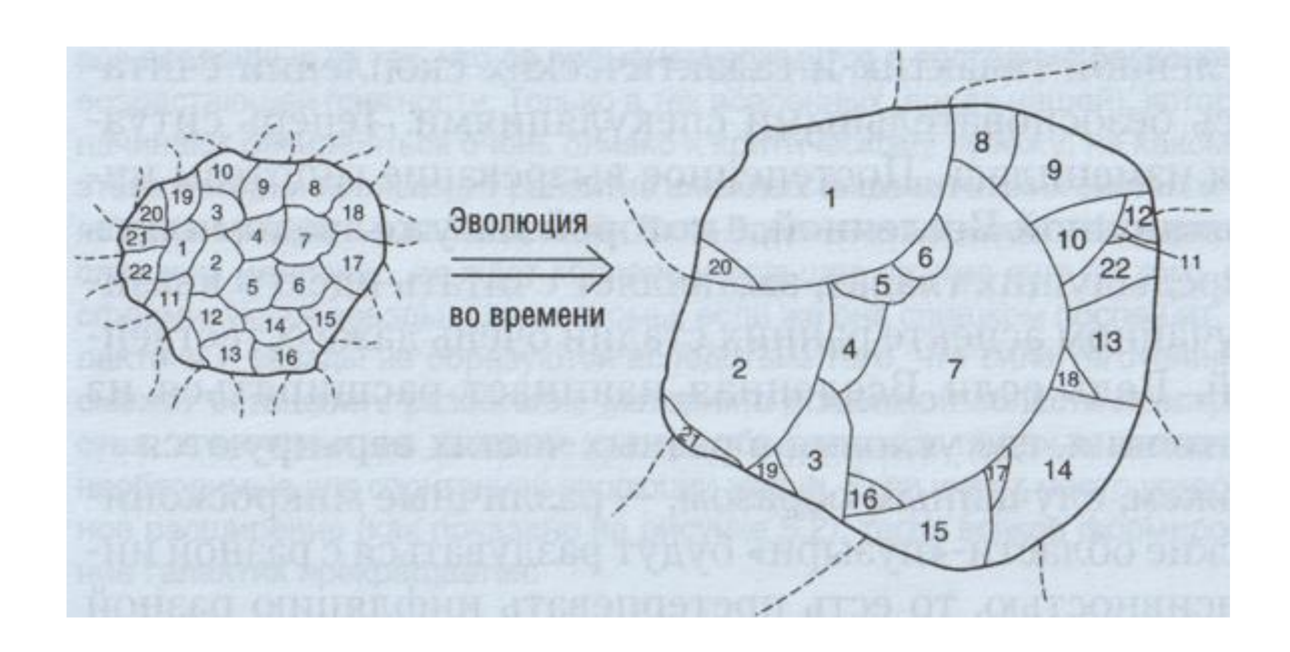


Рисунок 8.2. Эволюция хаотически-инфляционной Вселенной. Каждая микроскопическая связная подобласть Вселенной размером 10^{-25} сантиметра расширяется с разной интенсивностью на протяжении примерно 10^{-35} секунды. Каждая из пронумерованных подобластей вырастает в соответствующий большой регион, аналогичный нашей сегодняшней видимой Вселенной. Разумные наблюдатели могут появиться только в тех областях, которые подверглись достаточной инфляции, чтобы продолжать расширяться вблизи критического рубежа, отделяющего бесконечно расширяющиеся вселенные от вселенных, обреченных на сжатие (см. рисунок 8.1). Поэтому жизнь может возникнуть только в областях, подвергнувшихся наибольшей инфляции (см. регион 7). Если Вселенная бесконечна, таких частей должно быть бесконечно много, и, если в их начальных условиях случайным образом перебираются все потенциальные возможности, тогда должно возникнуть бесконечно много регионов, допускающих существование живых наблюдателей. Поэтому если есть какая-то ненулевая вероятность эволюции жизни (а она есть, раз мы существуем), тогда она должна иметь место в бесконечном множестве областей Вселенной бесконечного размера. Обратите внимание, насколько данная картина меняет наше понимание природы Вселенной. Если мы обитаем в области 7, тогда следует ожидать, что условия за горизонтом видимости существенно отличаются от наших. Наблюдения в пределах наблюдаемой Вселенной могут оказаться совершенно нерепрезентативными по отношению ко всему мирозданию.

область имеет тенденцию воссоздавать условия для последующей инфляции ее собственных микроскопических подобластей, и этот процесс никогда не заканчивается. Точно так же часть, выбранная как исходная в этой цепочке, сама представляет собой один из этапов бесконечной последовательности, тянущейся из прошлого. Космологические выводы могут быть сделаны

только в отношении тех элементов бесконечной последовательности, где существуют необходимые условия для эволюции наблюдателей. Сценарий вечной инфляции показан на рисунке 8.3. Влияние слабого антропного принципа возрастает по мере того, как космологи в своих попытках реконструировать прошлую историю мироздания подходят непосредственно к истокам. Чем ближе мы подступаем к предполагаемому началу Вселенной, Тем более многочисленными становятся эффекты нарушения симметрии и квантовой случайности, генерирующие случайные элементы, последствия которых порождают обсуждавшиеся выше сложности и тонкости интерпретации.

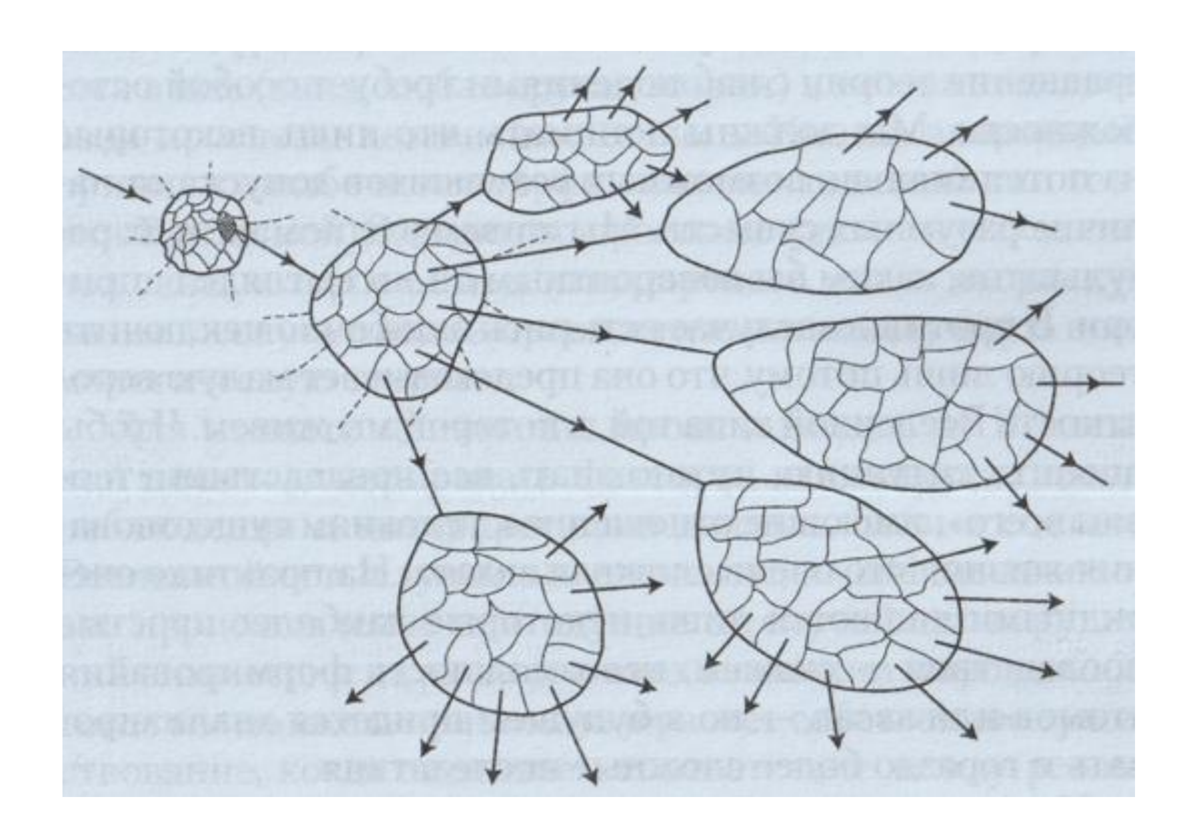


Рисунок 8.3. Эволюция вечной инфляционной Вселенной. Каждая расширяющаяся подобласть порождает большое число таких же областей, которые отвечают условиям, необходимым для того, чтобы они сами подверглись дальнейшей инфляции. Этот процесс может продолжаться до бесконечности и по этой же причине тянуться из бесконечного прошлого. В сочетании со сценарием, представленным на рисунке 8.2, мы видим, что реально существование бесконечной последовательности инфляционных вселенных, со временем распространяющихся на бесконечное пространство. Только в некоторых из этих раздувших вселенных в определенное время и в определенном месте инфляция оказывается достаточной, чтобы дать время и создать необходимые условия для эволюции жизни. И только в некоторых из подобных благословенных областей обстоятельства складываются так, что жизнь действительно успешно эволюционирует.

Эти проблемы – трудное испытание в попытках разобраться в природе "теории всего" и ее космологических последствиях. Когда из концепции вытекает целый ряд возможных результатов – либо вследствие нарушений симметрии, либо в силу ее квантового характера, – тогда сравнение теории с наблюдениями требует особой осторожности. Мы должны понимать, что лишь некоторые из потенциально возможных результатов допускают наличие разумных существ. Мы живем в одном из этих результатов, каким бы невероятным он ни выглядел априори. В противном случае есть риск ошибочно исключить теорию лишь потому, что она предсказывает малую вероятность Вселенной типа той, в которой мы живем. Чтобы оценить ситуацию, нужно знать все последствия "теории всего", имеющие отношение к условиям существования жизни. Это очень сложная задача. На практике очевидными являются лишь некоторые наиболее простые последствия – скажем, невозможность формирования атомов или звезд, – но в будущем придется анализировать и гораздо более сложные последствия.

Интересный пример того, как такого рода рассуждения влияют на содержание теорий, появился несколько лет назад, когда американский физик Ли Смолин применил аналогичные рассуждения к одной из общих гипотез Джона Уилера. Смолин предположил, что физические константы могут понемногу меняться каждый раз, когда материя сжимается и образует черную дыру, потому что в ее сингулярности материя переживает отскок и создает новую Вселенную. Как следствие, в долгосрочной перспективе самой вероятной Вселенной является та, где постоянные смещаются так, чтобы формирование черных дыр было максимальным. Утверждалось, что мы в состоянии проверить эту теорию при помощи ряда умозаключений. Любое изменение фактических величин физических констант всегда должно уменьшать массу черных дыр во Вселенной*. Однако мы видим, что это не совсем то, что предсказывает теория. Мы можем лишь населять одну из Вселенных с максимальным производством черных дыр, если она допускает существование жизни. Хотя данная концепция позиционировалась как альтернатива антропному принципу в части понимания величин физических констант, на самом деле она нуждается в нем (как и любая другая теория) и

* Разумеется, здесь предполагается, что подобный локальный максимум производства черных дыр действительно существует. Некоторые константы, как та, что контролирует силу гравитации, судя по всему, не имеют такого максимума, и производство черных дыр может быть сколь угодно большим при сколь угодно малых значениях этой константы.

не может делать свои прогнозы независимо от него. Иногда антропный принцип ошибочно воспринимается как новый тип теории Вселенной. Однако это просто методологическое положение, которое нельзя игнорировать, иначе мы рискуем выплеснуть с водой правильную или наилучшую космологическую теорию.

Для полного понимания происходящего во Вселенной нельзя игнорировать факторы, искажающие наши наблюдения и интерпретацию данных. Если в составе Вселенной есть случайные элементы, имеющие квантовое происхождение или идущие от случайных нарушений симметрии на ранних этапах эволюции мироздания, тогда мы должны принимать в расчет собственное существование, когда оцениваем соответствие между реальным положением вещей и космологическими предсказаниями какой-либо "теории всего". Кроме того, если случайные космологические элементы приводят к образованию Вселенной, структура которой сильно варьируется в разных ее частях, тогда локальные наблюдения в потенциально бесконечной Вселенной никак не могут дать полного знания о ее глобальной структуре.

Глава 9

МАТЕМАТИКА ПРИРОДЫ

Созерцайте небо, землю, море; все, что есть яркого в них или над ними; все, что ползает, летает, плавает; у всего есть формы, потому что у всего есть числа. Уберите число, и ничего не останется... Спросите, что радует вас в танце, и число ответит: "А вот и я". Исследуйте красоту телесной формы, и вы найдете, что число все расставляет по своим местам. Исследуйте красоту телесного движения, и вы увидите, что благодаря числу все происходит в свое время.

Августин Блаженный

В центре необъятных миров

Я не зайду так далеко, чтобы утверждать, что конструировать историю философии без глубокого изучения математических идей, присущих разным историческим эпохам, – это все равно что убрать Гамлета из числа действующих лиц в пьесе, носящей его имя. Это было бы слишком. Но вот с удалением из пьесы роли Офелии аналогию провести можно. Очень точное сравнение. Ведь роль очаровательной и немного безумной Офелии очень важна. Давайте примем как должное, что изучение математики есть божественное безумие человеческого духа, бегство от случайных повседневных забот.

Альфред Норт Уайтхед

Кто же он, человек, думающий о Вселенной? Учитывая, что многие века люди даже не подозревали ни о бескрайних океанах внешнего космоса, ни об огромном внутреннем мире элементарных частиц, XX век признается

нами как поворотный пункт в постижении истинной широты и глубины Вселенной. Поиски окончательного объяснения происхождения и структуры мироздания свидетельствуют о неоспоримой вере в то, что мы действительно способны добраться до самых основ реальности. Но ведь это очень странно. Наш мозг является продуктом законов природы, однако человек способен о них размышлять. Разве не удивительно, что мы (во всяком случае, некоторые из нас) способны постичь тайны мироздания? Это неожиданное обстоятельство имеет две стороны: количественную и качественную. Первый аспект очевиден: почему мы настолько умны, что способны постичь "теорию всего"? Нам известны математические теоремы, которые недоказуемы в принципе, или для доказательства которых самым мощным компьютерам пришлось бы трудиться день и ночь целую вечность. А почему "теория всего" должна быть проще этих теорем? По существу, количественные ограничения диктуются размерами человеческого мозга, емкостью памяти или производительностью тех искусственных "мозгов", которые мы можем создавать себе в помощь. Мы до сих пор не знаем, существуют ли фундаментальные ограничения на производительность мозга и компьютеров (оба рассматриваются как системы сбора и использования информации), накладываемые физическими законами. Весьма вероятно, что ограничения есть. Поэтому если продолжать наращивать искусственные мозги-компьютеры, объем их электронной начинки будет расти быстрее, чем площадь поверхности, а именно от последней зависит эффективность излучения избыточного тепла во избежание перегрева. Чтобы обойти эту проблему, можно последовать примеру живой природы и разрабатывать процессоры, имеющие губчатую структуру, а потому гораздо большую площадь поверхности по сравнению со сплошными телами той же массы и объема. Но такая стратегия приведет к значительному удлинению электрических сетей, необходимых для координации всей системы, а значит, замедлится скорость передачи сигналов.

Более интересным является вопрос, в какой мере человеческий мозг качественно приспособлен к познанию Вселенной. Почему мы думаем, что присущие нам категории мышления и понимания могут справиться со всей сложностью вопросов мироздания? С какой стати мы ожидаем, что "теория всего" написана на таком языке, который нам под силу расшифровать? С чего бы это в процессе естественного отбора у нас развились умственные способности, далеко превосходящие потребности выживания в прошлом и настоящем?

Есть один качественный аспект, отличный от всех остальных по глубине и таинственности. Речь идет о невероятно успешном математическом описании происходящих в реальном мире процессов и способности человеческого разума открывать и изобретать математические истины. Именно к этой тайне мы сейчас обратимся, потому что она подводит нас к пониманию вопроса о рациональной познаваемости (интеллигибельности) Вселенной вообще.

Число розы

Бог больше похож на притяжение, чем на препятствие.

Мэри Хессе

Говорят, что как розу ни назови, она будет пахнуть все так же сладко. В этом кроется глубокое различие между словами и числами. Если вы переименуете розу в чертополох, ее внутренние свойства от этого не изменятся – в худшем случае, придется внести поправки в ботанические каталоги, но на природе вещей это никак не отразится. Но если какой-то объект обладает числовым свойством, тогда его изменение неизбежно повлияет на саму природу вещей – это не просто переименовать одно число в другое. Такое впечатление складывается в силу предположения, что математические свойства вещей присущи им от природы. За ними стоит не просто название. Мы эти параметры не придумываем, а открываем. Кроме того, хоть мы и пользуемся обыденной речью для описания окружающего мира, судя по всему, нет какого-либо естественного соответствия между правилами грамматики и композицией, которая диктует, как пользоваться речью. А вот математический язык обладает встроенной логикой, которая неожиданным образом гармонирует с логикой реального мира.

Современная наука почти полностью базируется на математике. Эта страсть к числам как средству познания окружающего мира берет начало от пифагорейцев, которые были убеждены в том, что истинный смысл природы заключается в тех гармониях, что отображаются числами. Их взгляд на творение формировался на основе понятия о базовой единице, из которой

можно построить все остальные объекты во Вселенной. Числа имели в их глазах глубочайшее значение. Четные виделись носителями женского начала и символизировали все, что принадлежало матери-земле; нечетные считались мужскими и ассоциировались с небесами. Особый смысл был у каждого числа: четверка означала справедливость, пять – брачный союз и т. д. Мы унаследовали эту предрасположенность, но сочли целесообразным отойти от пифагорейцев в одном важном аспекте. Если они были убеждены в том, что числа сами по себе наделены каким-то особым смыслом, мы находим более полезным придавать значение факту существования численных взаимосвязей между вещами и поэтому фокусируем внимание на симметриях, преобразованиях, отображениях, программах. Этот подход имел наибольший успех, когда развивалась механика, интерес к которой пробудили труды Галилея, Ньютона и их последователей-единомышленников. Математическое описание природы позволило людям, размышлявшим о мироздании, переступить через культурные предрассудки и идентифицировать хотя бы самый минимум физических законов. Был создан универсальный язык, способствовавший научному мышлению и дедукции благодаря вплетенному в саму его ткань набору логических требований, которые выполнялись автоматически при надлежащем использовании этого языка. Более того, он позволил вытеснить многие логические операции из сознания в подсознание, чтобы мы могли выполнять их, даже не задумываясь.

В таком свете математика может показаться своеобразной формой искусства. Действительно, в некоторых вузах ее причисляют к категории скорее гуманитарных, нежели естественных наук. Однако она отличается от гуманитарных наук и искусств многими интересными аспектами. В математике не редкость одновременные открытия, что не свойственно последним. Два математика, принадлежащие к разным культурам, движимые разными мотивами, работающие независимо друг от друга, использующие совершенно непохожие методы, зачастую приходят к одному и тому же открытию или теореме. В литературе или музыке такие совпадения не встречаются. Независимое написание двумя авторами "Макбета" или симфонии Бетховена – это что-то невероятное, потому что подобное творчество ассоциируется с разумом создателя. Неповторимость творчества является отражением уникальности личности. Тот факт, что в математике (как и в естественных науках) случаются одновременные открытия, указывает на наличие неких объективных предметов изучения, не зависящих от мышления исследователя. Можно предположить, что, если бы существовала умная машина, способная доказывать теоремы, результаты ее

деятельности были бы похожи на те, а в некоторых случаях идентичны тем, что обнаружены людьми. Другой интересный контраст – это стиль работы ученых. Математикам свойственно сотрудничество. Очень многие научные статьи пишутся в соавторстве. В некоторых случаях совместная работа отражает взаимодополняющую природу навыков, которыми обладают соавторы (кто-то силен в постановке интересных задач, а кто-то особенно талантлив в части технической реализации решений), но во многих других случаях четкой демаркационной линии нет. Все авторы вносят вклад на всех уровнях и оттачивают конечный результат в процессе непрерывного обсуждения. Лично мне случалось писать научные статьи в соавторстве с двумя учеными, с которыми я никогда не виделся и даже по телефону не разговаривал. В гуманитарных науках и искусствах подобное сотрудничество – редкость. Встречаются, конечно, исключительные случаи, как, например, соавторство Гилберта и Салливана, но в их ситуации речь шла об объединении разных навыков во имя общего дела. Один писал музыку к опереттам, а другой – слова к ним. Много ли вы знаете произведений литературы или изобразительного искусства, где было бы сразу несколько авторов? Опять же, это можно объяснить субъективностью и потому уникальностью творческого процесса. Та легкость, с какой математики идут на сотрудничество, и эффективность опять-таки указывают на наличие некоего объективного предмета математических исследований, который нужно не творить, не придумывать, а открывать – как в естественных науках.

Философия математики

Попрание физических законов в библейских чудесах не так волновало религиозных философов, как попрание законов математики. Последняя все-таки занимает привилегированное положение, и возможность попрания ее вечных истин даже со стороны всемогущего Бога не может не тревожить.

Филип Дэвис, Рувим Херш

Прежде чем искать причины той удивительной эффективности, с которой математика описывает физический мир, рассмотрим вопрос о природе этой науки. Изучая математику и обучая ей других, мы практически

никогда не задаемся этим обманчиво простым вопросом, не говоря уже о том, чтобы ответить на него. Однако было бы интересно посмотреть, под каким углом он решался в прошлом, когда предположения об устройстве мира черпались из иных источников, нежели сегодня. Впечатление можно составить, если мельком заглянуть в три эпохи, когда споры о природе математического знания были особенно жаркими. Сначала рассмотрим противостояние точек зрения Платона и Аристотеля в Древней Греции, затем обратимся к пространным комментариям Роджера Бэкона и его современников и, наконец, познакомимся с совместными разработками математиков и физиков конца XIX века.

Платон утверждал, что материальный мир видимых явлений есть лишь тень истинной реальности вечных форм. Он объясняет, что нижний мир вечных идеальных сущностей представлен четырьмя стихиями, коими являются земля, воздух огонь и вода. Каждая соответствует одному из правильных геометрических тел: земля представлена кубом, вода – икосаэдром, воздух – октаэдром, огонь – тетраэдром. Платон стоит на том, что в конечном счете стихии не просто обладают соответствующими геометрическими фигурами как одним из свойств; они являются этими фигурами. Преобразование стихий одна в другую он объясняет слиянием и разделением треугольников. Это строго математическое описание характеризует платоновский подход и ко многим другим физическим проблемам. Для него математика является средством проникновения в мир идеальных форм, скрывающийся за видимым миром чувственных данных. Чем лучше мы понимаем это, тем ближе подходим к истинному знанию. Для Платона математика является чем-то более фундаментальным, истинным, чем-то более близким к вечным идеям-формам, чем объекты, изучаемые физической наукой. Поскольку мир в своей глубинной сути является математическим, все наблюдаемые феномены обязательно имеют какие-то математические аспекты и могут быть в большей или меньшей степени описаны математически – в зависимости от их близости к лежащим в их основе абсолютам.

Сложившаяся несколько позже точка зрения Аристотеля на взаимоотношения между математикой и природой была принципиально иной. Аристотель хотел высвободить естествознание из мертвой хватки математических оков, в которые оно было заковано Платоном. Он верил в существование трех абсолютно автономных областей знания – метафизики, математики и физики, каждая из которых имеет собственную методику и свою проблематику. Но это разделение преодолевалось существованием

более общего принципа однородности – "подобное познается подобным", – которому все должно подчиняться:

> "Принципы чувственно воспринимаемых вещей, вероятно, должны быть чувственно воспринимаемыми, вечных – вечными, преходящих – преходящими и вообще принадлежащими к тому же роду, что и подчиненные им вещи".

Платоновская методика объяснения сути вещей очевидным образом этот принцип нарушает, когда он пытается физические вещи объяснять математически, а не физически. Чтобы понять точку зрения Аристотеля на отношения между математикой и физикой, необходимо иметь в виду, что принятое им разделение научного знания на метафизику, математику и физику было иерархическим и существенно отличалось от трактовки тех же трех столпов знания Платоном. Физика имеет дело с обыденным миром материальных вещей, лишенным каких-либо теоретических абстракций. Это царство прагматика. Математика вступает в дело на более высоком уровне идеализации, абстрагируя некоторые важнейшие свойства вещей и пренебрегая остальными. Наконец, когда исследователь пренебрегает всеми свойствами вещей, кроме их чистого бытия, такой уровень абстракции требует уже перехода в царство метафизики. Сегодня мы могли бы построить сравнимую иерархию на языке физических законов: можно изучать конкретные результаты действия физических законов, сами законы и, наконец, некий метамир, где потенциально (а может, и реально) существуют различные альтернативы тем законам природы, которые нам известны.

Аристотель проводит резкую разграничительную линию между деятельностью математика и физика. Первый ограничивает свои поиски количественными аспектами мироздания, тем и только тем, что может быть описано математическими понятиями. Сфера же деятельности второго, по Аристотелю, гораздо шире и охватывает весь мир чувственно воспринимаемых вещей. Если Платон придерживался мнения, что математика представляет собой истинную глубинную реальность, для которой мир физический является лишь бледной тенью, то Аристотель считал ее поверхностным описанием части физической реальности. Таким был контраст между идеализмом и реализмом в античном мире.

После последовавшей затем многовековой спячки этот конфликт взглядов Платона и Аристотеля на взаимоотношения между математикой и окружающим миром снова стал предметом дискуссий в эпоху Средневековья. Это было связано с необходимостью как-то синтезировать

идеи античных мудрецов с ранней христианской теологией. Такие влиятельные мыслители, как Августин и Боэций, неявно поддерживали Платона, отстаивавшего первичный характер математики. Они оба указывали на тот факт, что все вещи были изначально сотворены "мерою, числом и весом" или "согласно характеру чисел". Таким образом, математика заняла достойное место в средневековом квадривиуме как основа всех прочих знаний. Правда, Боэций впоследствии принял точку зрения Аристотеля, утверждая, что по пути от физики к математике происходит некий акт абстрагирования мышления, и это делает данные две дисциплины качественно различными.

К XII веку наука стала постепенно просыпаться и выходить из тени. Средневековые схоласты проявляли интерес как к платоновской, так и к аристотелевой точкам зрения на взаимоотношения математики и физического мира. На переднем крае тогдашней возрождавшейся науки находились английские схоласты Роберт Гроссетест и Роджер Бэкон. Первый утверждал, что не всякое знание, относящееся к физическому миру, опирается на математику, и во многих случаях его тезисы звучали в унисон с традиционными взглядами Аристотеля. Но он пошел несколько дальше, предложив свою иерархию наук. В исследовании свойств света Гроссетест подчеркивал, что математика необходима для объяснения наблюдаемых явлений, "поскольку всякое естественное действие меняет свою силу и слабость согласно изменению линий, углов и фигур". Идеи Гроссетеста в плане соотношения математики и природы оказали большое влияние на Роджера Бэкона, который написал на эту тему не одну сотню страниц, и, пожалуй, можно сказать, что никто другой в истории не посвятил столько внимания данному вопросу. Бэкон верил, что математическое знание заложено в каждого человека от природы и математика является уникальной формой мышления, присущей как нам, так и природе. Ее уникальность характеризуется тем фактом, что она позволяет достичь абсолютной точности и достоверности знания, а значит, всем нашим прочим знаниям мы можем доверять лишь постольку, поскольку они зиждятся на математических принципах:

> "Одна лишь математика... остается для нас предельно достоверной и несомненной. Поэтому с ее помощью следует изучать и проверять все остальные науки".

Кроме того, Бэкон был приверженцем использования математики для доказательства свойств мироздания. Самыми интересными являются его

первые топологические аргументы в отношении природы космоса. Он считает, что мир должен иметь сферическую форму, иначе вращение порождало бы вакуум. Кроме того, может существовать только одна Вселенная, потому что, если бы была другая, она тоже была бы сферической, а значит, между "нашей" и той имела бы место ненавистная природе (по мнению Аристотеля) пустота. Бэкон занимает позицию где-то посредине между Платоном и Аристотелем, и он очень многим обязан Гроссетесту. Бэкон расширил роль математики в природе, не подменяя, однако, ею весь мир. С практической точки зрения, он очень эффективно использовал математику в прикладных науках и применял ее для защиты своих религиозных идеалов.

Несмотря на богатое физико-математическое наследие Галилея и Ньютона, скептическая философская традиция континентальной Европы и бурное развитие математической науки привели к тому, что к XIX веку математика все больше уходила в отрыв от физических приложений. Стремительно расширявшуюся математику начали делить на чистую (абстрактную) и прикладную. Такие влиятельные физики, как Друде и Кирхгоф, держались мнения, что задача науки состояла в описании мира, как можно более простом и полном. Наука, утверждали они, ничего о действительности сказать не может: она лишь "отображает мир феноменов". Более того, Друде считал опасной веру в математические основы мироздания, поскольку мы рискуем впасть в заблуждение косного формализма приверженцев чистой математики. Такой взгляд был достаточно распространенным. Кроме философов-операционалистов, эту точку зрения разделяли такие физики, как Максвелл, Герц, Больцман и Гельмгольц. На этой основе в начале XX века разгорелась бурная дискуссия на предмет смысла и значимости старой идеи Лейбница о "предустановленной гармонии" между абстрактными математическими построениями и умозаключениями и фактической структурой внешнего мира. Это теснейшим образом связано с тем вопросом, который мы поднимаем и сегодня, – о той непостижимой, иррациональной эффективности, с какой математика описывает физический мир.

Лейбниц пытался найти убедительное объяснение гармоничных соотношений между способностями и восприятиями человеческой души и структурой физического мира. Это была проблема, ведь Лейбниц стоял на том, что мир души и материальный мир существуют совершенно раздельно. Чтобы разрешить данное противоречие, он выдвинул предположение, что существует "предустановленная гармония" между этими двумя мирами.

Реакция со стороны научного сообщества была противоречивой. Некоторые, как Фурье, настаивали, что математическое знание следует получать прежде всего на основе физических наблюдений. Идею предустановленной трехсторонней гармонии между человеческим разумом, математикой и физическим миром поддерживал Эрмит, видевший метафизическую тождественность между миром математики и миром физики в сознании исследователя. В современной научной среде понятие предустановленной гармонии воспринималось как не более чем замаскированная разновидность платонизма, неявно указывавшая на математические понятия как на источник как математических идей, так и математических аспектов физического мира. То и другое суть отражения, хоть и разной интенсивности, математических абсолютов, населяющих платоновские небеса. Но когда такие выдающиеся математики, как Минковский и Гильберт, обнаружили потрясающую гармонию между результатами их абстрактно-математических исследований и явлениями физического мира, многие сочли утверждения о существовании такой гармонии слишком соблазнительными, чтобы им можно было противиться. Так, в первые годы XX века мы начали понимать, почему применение Минковским комплексных чисел для описания пространства-времени один физик назвал "одной из величайших мировоззренческих революций".

Возникает вопрос: "В какой степени частные аспекты реального мира, необходимые для идентификации его уникальности, – точная величина физических констант, выбор между разными формами уравнений – должны дополнять математику?" Хотя многие физические теории (типа общей теории относительности Эйнштейна) в значительной части выглядят как сплошная математика, соотношения между материей и геометрией пространства-времени не диктуются только этой наукой: она должны обеспечивать сохранение энергии и количества движения. Кроме того, нет никаких причин считать, что геометрия пространства-времени должна описываться частными типами римановой геометрии. Существуют более сложные разновидности геометрии, которыми, в принципе, могла бы воспользоваться природа, и в настоящее время об этом можно узнать только посредством наблюдений. Таким образом, математика сама по себе не сообщает, какой ее разновидностью пользовалась природа в каждом конкретном случае. Разумеется, это может быть лишь отражением нашего относительного невежества, непонимания общей картины, где востребовано все, что не исключено.

Предоставим последнее слово на тему предустановленной гармонии, гак волновавшей физиков в начале XX века, Альберту Эйнштейну, который в молодости свято верил в предложенное Лейбницем объяснение, почему природа так хорошо согласуется с абстрактным человеческим мышлением:

> "Никто из тех, кто действительно углублялся в предмет, не станет отрицать, что теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории. В этом суть того, что Лейбниц удачно назвал “предустановленной гармонией”".

Много лет спустя его мировоззрение дозрело до того, что в Древней Греции его приняли бы за своего:

> "Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут ключ к пониманию явлений природы. Опыт подскажет соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него. Конечно, опыт остается единственным критерием пригодности математических конструкций физики. Но настоящее творческое начало присуще именно математике. Поэтому я считаю в известном смысле оправданной веру древних в то, что чистое мышление в состоянии постигнуть реальность".

За этими словами скрывается интересное изменение отношения Эйнштейна к математике. В ранних трудах, посвященных специальной теории относительности, броуновскому движению, а также фотоэлектрическому эффекту (который и принес ему Нобелевскую премию), он старается избегать сложных математических расчетов и использует простые физические аргументы, позволяющие проникнуть в самую суть рассматриваемого вопроса. Но уже его общая теория относительности неотделима от огромного формально-математического аппарата, и мы видим, что чистая математика, применяемая в решении вопросов физики, способна на многое. С помощью абстрактных построений удается ввести в оборот понятия, которые было бы трудно внедрить в физику и обосновать, используя непосредственно аппарат только этой дисциплины. После успешного применения сложных математических расчетов в обосновании общей теории относительности, увидевшей свет в 1915 году, поиски единой теории поля Эйнштейн свел к поискам более общих математических формул, которые могли бы свести воедино существующие описания гравитации и электромагнетизма. Здесь уже нет интересных поворотов мысли, красивых

рассуждений, на которых строился успех его первых работ. Как свидетельствует последняя из приведенных цитат, Эйнштейн с годами все больше убеждался в том, что простую и гармоничную единую картину мира можно создать лишь на основе математического формализма.

Что такое математика?

Большая неприятность случилась в Перу с французскими математиками. Похоже, они решили продемонстрировать свою галантность женам аборигенов, и обманутые мужья в отместку поубивали их слуг, уничтожили и сожгли их бумаги. Сами джентльмены едва избежали расправы.

Колин Маклорен
(из письма к Джеймсу Стирлингу, 1740 год)

Конец XIX века предложил множество вариантов ответа на вопрос о природе и сути математики, а мотивацией для его формулировки стали накопившиеся проблемы, связанные с бурным развитием этой дисциплины в различных направлениях. Все многочисленные подходы можно свести к нескольким простым философско- математическим системам.

Первая – формализм – избегает всякого обсуждения смысла математики. Последняя определяется всего лишь как множество различных логических цепочек, вытекающих из непротиворечивых систем аксиом с использованием всевозможных правил вывода. Результирующая паутина логических связей, по мнению ранних формалистов, заключает в себе всю математическую истину. Любое высказывание на языке математики может быть исследовано на предмет правильности вывода из непротиворечивого набора аксиом. Если первые используются корректно, никаких парадоксов не будет. Ясно, что такой вызывающий клаустрофобию образ математики не поможет ответить на вопрос о причинах эффективности математики как средства описания физического мира. С точки зрения формалистов, математика – не более чем логическая игра наподобие шахмат. Она ничего не означает и не содержит никакого смысла. Однако, как известно, грандиозная попытка приверженцев формального подхода свести концы с концами провалилась. Курт Гёдель первым показал, что в математике

должны существовать высказывания, истинность или ложность которых нельзя продемонстрировать при помощи правил вывода, если система аксиом достаточно развернута, чтобы включать в себя знакомую целочисленную арифметику. Мы это обсуждали (под несколько иным углом) в главе 3. Поэтому строго формальная манера, в которой можно описать все варианты игры в крестики-нолики, в математике неприемлема.

Второй подход я называю *инвенционизмом*. Математика трактуется как чисто человеческое изобретение. Она – плод нашего воображения, все равно как литература или музыка. Она есть не больше и не меньше того, что делают математики. Мы ее изобретаем и ею пользуемся, но ничего не открываем. Нет какого-то "иного мира" математических истин, который ждет, когда его откроют. Реальность ничего математического в себе не несет. Математика – это всего лишь инструмент или способ мышления, помогающий познавать окружающий мир. Удается более-менее хорошо истолковать только те элементы мироздания, которые поддаются математическому описанию. В таком ракурсе эффективность данной дисциплины объясняется тем, что мы придумываем или подбираем те математические инструменты, которые наилучшим образом "работают" в каждом конкретном случае. Подобный взгляд превалирует в среде экономистов, обществоведов и всех тех, кому приходится иметь дело с очень сложными системами, где симметрия не играет никакой роли, или наблюдаемые события представляют собой запутанные или случайные последствия естественного отбора. Во многих ситуациях внимание исследователей сосредоточено на результатах организующих процессов (или их отсутствии), которые обсуждались в одной из предыдущих глав. Они очень далеки от наиболее фундаментальных, начальных законов природы. Сторонники такой точки зрения объясняют математическую сноровку человеческого разума, наличие гармоничного соответствия между самой действительностью и тем, как она отображается в человеческом сознании, эффектами эволюции, потребностями выживания человека как вида. Если бы мы путали понятия "там" и "здесь", "прежде" и "после", не умели распознавать причинно-следственные связи, у нас было бы гораздо меньше шансов на то, чтобы выживать, плодиться, размножаться и расширять генофонд. Этот подход дает историческое обоснование реалистичной картины мира, но лишь до определенной степени. Есть такие ниши – скажем, мир элементарных частиц, космология, высокотемпературная сверхпроводимость, квантовая механика, – о которых в ходе эволюции, сформировавшей наши умственные способности, мы не знали и никакой

потребности в них, с точки зрения выживания, не имели. Быть может, эти экзотические области знания просто затрудняют использование базовых концепций, верно следовать которым нас приучил естественный отбор еще в первобытные времена. Альтернатива, предложенная Нильсом Бором для объяснения того, почему нам так трудно дается интерпретация квантовой дополнительности, заключается в том, что существуют понятия и области физической реальности, которые никак не поддаются концептуальному пониманию именно потому, что необходимые для этого идеи не сыграли никакой роли в нашей эволюционной истории. Согласно Бору, наши категории мышления, эти ментальные фильтры чувственно воспринимаемой извне информации,

> "развивались с оглядкой на окружающую среду и организацию человеческих сообществ".

Когда мы наталкиваемся на явления, удаленные от повседневного опыта, неизбежно возникают, по мнению Бора,

> "трудности с ориентацией в сфере опыта, далекой от того, к описанию чего приспособлены наши средства выражения".

Разумеется, никто не мешает экстраполировать данный подход еще дальше, "объясняя" таким образом все тайны. Но чтобы это не свелось к абсолютно голословным "сказочкам", необходимо позаботиться о точной идентификации процессов нейрофизиологической адаптации. Во многих случаях убеждает та или иная форма анализа из теории игр. Например, можно попробовать с точки зрения эволюции обосновать, почему люди говорят правду, но не всегда. Если бы все всегда говорили только правду, тогда выигрыш потенциального нарушителя правил был огромным. С другой стороны, если лгать будут все и всегда, обществу придет конец. По-видимому, между этими двумя крайностями существует естественное состояние равновесия, где люди большую часть времени говорят правду, но и ложь является достаточно распространенным явлением, чтобы в целом правдивые граждане не попадались на удочку бессовестных лжецов.

Для инвенциониста математика представляет собой одну из категорий мышления, и фундаментальные ограничения ее возможностей, вроде тех, что обнаружил Гёдель, ассоциируются именно с нашими категориями мышления, а отнюдь не с самой реальностью.

Следующий философский подход к пониманию природы математики – это интерпретация реалистическая, или платонизм. Внешне самая простая,

она сводится к тому, что математика реально имеет место быть и ее открывают. Математические истины существуют независимо от людей. Она является формой объективной, универсальной истины. Поэтому причина успешности математики в описании мироустройства заключается в том, что мир сам по себе является математическим. Любые ограничения возможностей математики вроде тех, что были открыты Гёделем, с нашими категориями мышления никак не связаны, но объясняются особенностями, присущими самой реальности. По этой же причине имеют ограничения и любые наши попытки до конца постичь Вселенную.

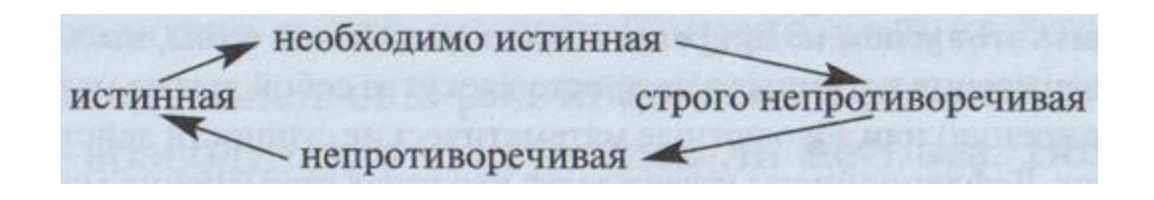
В силу этой интерпретации "теория всего" должна быть концепцией математической. Разумеется, сторонники данной точки зрения ссылаются на успешное математическое описание мироздания как на подтверждение своих взглядов. Но даже при этом удивительно, что столь сложный и многообразный мир описывают такими элементарными математическими понятиями. Быть может, мы попросту не заглянули в глубину мироздания, чтобы понять, насколько сложна в действительности структура Вселенной? Достаточно вспомнить, что проблемы, поднятые струнной теорией, побудили создателей этой концепции утверждать, что она была открыта преждевременно и нынешний уровень знания еще не позволяет справиться с возникшими вопросами. Здесь мы имеем дело с редким и потому поразительным примером физической теории, опережающей возможности математики и фактически показывающей ученым новые плодотворные пути дальнейшего развития абстрактно-математических исследований.

Помимо традиционного вопроса о том, где реально находится мир платоновских идеальных математических абсолютов и что он собой представляет, эта точка зрения поднимает еще ряд интересных вопросов. Математика возводится в статус едва ли не Бога. Возьмите любой средневековый богословский трактат и замените в любой фразе "Бог" словом "математика", и вы увидите, что все сказанное сохранит смысл. Математика является частью мира, но при этом пребывает вне его и над ним. Она должна существовать до и после Вселенной. В этом отношении вспоминается обсуждение природы времени в одной из предыдущих глав. В ньютоновской картине мира пространство и время были абсолютами, совершенно не зависящими от событий, которые происходят на их фоне. Затем Эйнштейн трансформировал концепции пространства и времени, соединив пространство-время с событиями, происходящими во Вселенной (радикальность этой трансформации несколько затмевается тем обстоятельством, что новые концепции сохранили названия старых). Может

быть, подобная эволюция интерпретации ждет и математику? Хотя в настоящее время математика видится чем-то более широким, нежели Вселенная, поскольку космологи верят в возможность математического описания мироздания в целом и используют данную дисциплину для изучения процессов аннигиляции вселенных, не исключено, что в будущем природа математики будет восприниматься в более тесной ассоциации с физически реализуемыми процессами, такими как вычисления.

Большинство физиков и математиков ведут себя так, словно философия платонизма является непреложным фактом, даже если не верят в это; иначе говоря, как первооткрыватели в неизведанном мире математики*.

* Интересная и достаточно тонкая альтернативная точка зрения предлагается в рамках дефляционистской философии математики. Согласно этой антиреалистической философской теории, мы не можем знать о реальности математических сущностей, которые Платон принимал за данность, и у нас даже нет оснований верить в их существование. Но в отличие от приверженцев других антиреалистических подходов, дефляционисты не пренебрегают успешным применением математики в описании физического мира и пытаются объяснить этот успех, не прибегая к предположениям о том, что математические утверждения истинны (а не просто влекут за собой другие математические утверждения) или абсолютные математические сущности действительно существуют. Дефляционисты утверждают, что успех применения математики в физике требует от математической теории лишь одного качества – строгой непротиворечивости. Математическую теорию "M" называют строго непротиворечивой, если при добавлении ее к непротиворечивой теории "T", которая ничего не говорит о математических сущностях, результирующая теория "T + M" также является непротиворечивой. Интересно отметить, что, если из истинности концепции свойство строгой непротиворечивости не следует, оно вытекает из свойства необходимой истинности. В целом имеет место нижеследующий круг логических импликаций, связывающих теории истинные, необходимо истинные, непротиворечивые и строго непротиворечивые (стрелка означает импликацию, то есть "следует"):



Этот подход пытается вычленить то особое "хорошее" качество математических теорий, которое делает их полезными. Подчеркивается, что истинность математической теории не всегда гарантирует, что она "хорошая" в указанном смысле; нельзя также сказать, что все "хорошие" теории являются необходимо истинными. Применяя математику в изучении физического мира, мы требуем от нее лишь строгой непротиворечивости, а не более сильного свойства истинности.

Физики, специализирующиеся на элементарных частицах, являются наиболее преданными сторонниками платонизма, потому что весь предмет их исследований строится на вере в то, что мир в основе своей строго

симметричен. Они рассматривают одну симметрию за другой, уверенно рассчитывая, что самая большая и лучшая из них как раз и лежит в основе великого порядка вещей. Но сегодня философия Платона все же не так вездесуща, как это было полтора века назад, в Викторианскую эпоху, когда научные библиотеки пополнялись книгами, имевшими такие названия, как "Теория звука" или "Гидродинамика". Сегодняшние инвенционисты очень нервозно относятся к существованию подобных "абсолютных", единственных в своем роде математических теорий, не зависящих от сознания человека, что находит наглядное отражение в названиях книг. В моде сейчас такие названия, как "Математическое моделирование звуковых феноменов" или "Концепции течения жидкости", где подчеркивается субъективность и неуникальность предлагаемого на страницах книги описания.

Одно из драматических последствий платоновского мировоззрения состоит в том, что формы жизни должны существовать постольку, поскольку существуют их математические модели. Если бы мы создали компьютерную модель эволюции небольшой части Вселенной, включив в нее, скажем, планету, похожую на Землю, тогда эту имитацию, в принципе, можно было бы усовершенствовать до такой степени, чтобы она включала в себя эволюцию мыслящих существ, обладающих самосознанием. Последние знакомились бы и общались с другими подобными себе существами и могли бы вывести правила программирования, которые условно назвали бы "законами природы". Известно, что такая программа есть, потому что мы существуем, и последовательность событий, которая привела к тому, что сегодня мы есть, может быть смоделирована. А раз такая программа имеет место, то разрешается утверждать, что разумные создания существуют только в том смысле, который запрограммирован для них. Более того, мы можем быть частью аналогичной имитационной модели в сознании Бога. Фрэнк Типлер следующим образом обобщает наиболее радикальную интерпретацию такого рода компьютерного онтологического аргумента:

> "Программа, достаточно сложная, чтобы включать в себя наблюдателей, обязательно существует. Идея в том, что все физические процессы могут быть смоделированы компьютерной программой. А значит, достаточно сложная программа может смоделировать всю Вселенную. Более того, если имитация является совершенной, тогда она по определению должна быть неотличима от реальной Вселенной. Каждый человек и каждый его поступок имеют точную аналогию в имитационной модели. Согласно имитируемым наблюдениям имитируемых людей в имитируемой вселенной, они

реально существуют. Получается, что мы сами могли бы оказаться такой имитацией. Изнутри модели никак нельзя сказать, что она имитация; программа не может знать, на каком “железе” ее запускают. Более того, нет даже причин для существования “железа”; как говорит Мински, “вселенная просто не существует”. Таким образом, если программа (или физическая теория), содержащая наблюдателей, существует математически, она обязательно существует и физически, в единственном разумном смысле физического существования: наблюдатели наблюдают за собственным существованием".

Читатель наверняка обнаружит в этой аргументации опасный перегиб – то, что любой физический процесс может быть сымитирован компьютерной программой. Мы не знаем, так ли это; во всяком случае, не каждую математическую операцию можно сымитировать подобным образом. Существуют "истинные" теоремы, которые нельзя вывести шаг за шагом, как это делает компьютерная программа. Чуть ниже мы еще поговорим об этом. Здесь данный вопрос затронут лишь потому, что он естественным образом подводит нас к четвертой из возможных интерпретаций математики.

Философия конструктивизма зародилась в конце XIX века в атмосфере неуверенности и неопределенности, порожденной логическими парадоксами теории множеств и странными канторовскими свойствами бесконечных множеств. Из-за опасений, что манипулирование такими математическими концепциями, как бесконечность, в отношении которых у нас нет никакого физического опыта, может привести к серьезным ошибкам и противоречиям, ряд математиков заняли достаточно осторожную, консервативную позицию, предлагая рассматривать в рамках дисциплины только такие идеи и высказывания, которые можно вывести при помощи конечного числа пошаговых логических конструкций из натуральных чисел, почитая их самыми фундаментальными и богоданными. Поначалу такой подход кажется не более чем бюрократической перестраховкой, но его последствия с точки зрения охвата и смысла математики оказываются весьма драматичными.

Подчинение логической аргументации требованиям конструктивистов лишает нас таких знакомых и удобных инструментов, как доказательство от противного (иначе называемое приведением к абсурду), где берется в качестве верной какая-то исходная посылка, из нее выводится логическое противоречие, позволяющее прийти к заключению, что исходное предположение должно быть ложным. Если принять конструктивистскую

философию, содержимое математики заметно убавится. Последствия такого сокращения сферы действия математики имеют значение и для естествознания. Например, физикам пришлось бы отказаться от знаменитых теорем о сингулярности общей теории относительности, уточняющих достаточные условия, которым должна удовлетворять Вселенная и ее материальное наполнение, чтобы в прошлом мог иметь место момент времени, когда законы природы не существовали – тот самый момент сингулярности, который мы называем Большим взрывом. Дело в том, что эти теоремы не конструируют момент сингулярности в явной форме; они скорее основываются на доказательстве от противного, показывающем, что несуществование такого момента влечет за собой логическое противоречие. Важный урок, который нужно извлечь из сказанного, заключается в том, что истинность тех или иных утверждений в отношении Вселенной зависит от принятой философии математики. Это является теневой стороной математичности мира, в котором мы живем.

Ясно, что конструктивизм – близкая родня философии операционализма, согласно которой само определение вещей зависит от способа их реализации или создания. Самым интересным физическим параметром здесь является время. Если определять время в зависимости от процессов его регистрации, возникает возможность того, что Вселенная имела бесконечное прошлое – если существуют фундаментальные меры явлений, происходящих в мироздании, которые замедляются по мере того, как мы отодвигаемся все дальше в прошлое.

Конструктивистская философия естественным образом влечет за собой концепцию компьютеров, поскольку последние как раз и занимаются пошаговым построением математических утверждений. Сущность всех практических компьютеров сводится попросту к способности прочитать цепочку целых чисел и трансформировать ее в другую. Этой способности, несмотря на кажущуюся тривиальность, достаточно для работы самых мощных компьютеров в мире. Их главным достоинством как вычислительных инструментов является скорость, с которой они выполняют простейшие операции, а также в некоторых случаях – несколько операций одновременно. Это основа всех абстрактных вычислительных устройств, называемых машинами Тьюринга, по имени английского математика Алана Тьюринга. Данный термин используется по отношению к любому пошаговому логическому устройству.

Первоначально надеялись, что подобное гипотетическое устройство сможет выполнять любые математические операции и позволит механически каталогизировать все разрешимые математические истины. Алан Тьюринг, Алонсо Черч и Эмиль Пост первыми показали несостоятельность идеи. Существуют математические операции (так называемые невычислимые функции), которые не выполнит никакая машина Тьюринга. Разумеется, есть также операции, которые машина могла бы выполнять шаг за шагом, но реализация которых даже на самых быстрых из них заняла бы миллионы лет. С практической точки зрения такие процессы тоже являются невычислимыми, и именно на них базируется современная теория шифрования информации. Однако они отличаются от настоящих невычислимых функций тем, что реализация последних на любой машине Тьюринга заняла бы бесконечный период времени: до этапа распечатки результатов подобная машина так никогда и не доберется.

Если конструктивистская картина математики верна, то открываются глаза на многие загадки Вселенной. Она позволяет по-новому взглянуть на вопрос о причинах невероятной эффективности математики в описании реального мира. Очень многие простые математические операции являются вычислимыми в смысле Тьюринга. Вычислимые функции – это математические операции, которые можно смоделировать при помощи реального устройства, артефакта физического мира, состоящего из элементарных частиц и подчиняющегося всем физическим законам. А реальные устройства, или природные явления, так хорошо описываются простыми математическими функциями, потому что многие из них являются вычислимыми. Если бы все простые математические функции были невычислимыми, тогда математика не была бы удобным средством описания физического мира. От неконструктивных теорем или истин практической пользы было бы мало.

Структурализм является последней из философских интерпретаций математики. Эта философия, избавленная от метафизических крайностей, является самой слабой из всех рассмотренных, но при этом самой простой и прямолинейной с точки зрения стороннего наблюдателя. Математика рассматривается как каталог всевозможных структур (схем, узоров, закономерностей). Некоторые из них мы видим на обоях и в цветах, растущих в саду; другие наблюдаем в движении небесных тел; третьи – в вычислительных процессах или у нас в головах. Когда математика рассматривается под таким углом, ее полезность для физики перестает быть тайной. Вселенная, чтобы в ней могла возникнуть и развиваться жизнь,

должна содержать в себе определенный порядок (структуры), и математика лишь описывает его. Однако главная тайна не исчезает. Почему Вселенная поддается описанию столь простыми системами и закономерностями? Разве она не могла быть структурирована закономерностями, невычислимыми в смысле Тьюринга? Тогда математика точно так же описывала бы Вселенную, но не имела никакой практической пользы в плане предсказания будущего или постижения настоящего. Наша Вселенная необычайно сжимаема в том смысле, что все ее многообразие и сложность можно свести к очень небольшому числу достаточно простых закономерностей. И цель физиков, ищущих "теорию всего", состоит в том, чтобы сократить это число до единицы, имеющей четко очерченный смысл.

Математика и физика: всегда вместе

О государь, не напрягайте ум
*Разгадываньем тайн...**

Уильям Шекспир

Поразительный симбиоз математики и физики прослеживается в веках. Эти взаимоотношения обладают также удивительной симметрией: существуют примеры того, как достаточно старые математические понятия подстраиваются под новейшие открытия физиков, равно как стремление глубже постичь физический мир приводит к созданию новых разделов математики, которые затем развиваются сугубо в рамках своей дисциплины. Познакомимся с наиболее яркими явлениями из каждой категории. Сначала приведем несколько примеров идей, впечатляющих симметрией, внутренней логикой и общностью понятий. Первоначально их разрабатывали математики, но впоследствии они оказались наилучшими инструментами для описания и постижения новых аспектов мироздания.

* Перевод М. Донского.

Конические сечения

Аполлония Пергского (262-200 гг. до н. э.) считают одним из величайших математиков античности. Он был современником Архимеда, изучал математику в школе, основанной последователями Евклида. Его оригинальные труды в большинстве утрачены, но до нас дошли его исследования конических сечений. Он четко изложил все геометрические и алгебраические свойства эллипсов, парабол и гипербол. Без этих описаний Кеплер не смог бы сформулировать в 1609 году свои законы движения планет. Позже законы Кеплера были выведены Ньютоном из его гравитационного закона обратных квадратов, и этим объяснилось полное физическое значение эллиптических, параболических и гиперболических кривых в описании орбит тел, движущихся под влиянием силы тяготения.

Риманова геометрия и тензоры

То, что в XIX веке Риман разрабатывал неевклидову геометрию как абстрактно-математическую дисциплину и изучал математические объекты под названием тензоры, стало для физиков XX века великим подарком. Тензоры характеризуются тем свойством, что составляющие их компоненты меняются весьма специфическим образом при произвольном изменении системы координат. Этот необычный математический аппарат очень пригодился Эйнштейну при разработке общей теории относительности. Неевклидова геометрия описывает искривления пространства и времени в присутствии массы-энергии, в то время как свойства тензоров гарантируют, что любой физический закон, написанный на языке тензоров, будет автоматически сохранять ту же самую форму при любом движении наблюдателя. Более того, Эйнштейну очень повезло, что его давнишний друг, математик Марсель Гроссман, в свое время познакомил его с этими математическими инструментами. Если бы не они, Эйнштейн не смог бы сформулировать свою общую теорию относительности.

Группы

Мы уже не раз подчеркивали колоссальную роль симметрии в современной физике. Математики систематически изучают ее в рамках теории групп. В основном этот раздел был создан в середине XIX века, и опять-таки без какой-либо мотивации со стороны физики. В его рамках изучают конечные группы, рассматривая различные дискретные преобразования (типа вращений), и группы непрерывных преобразований.

Последние очень подробно исследовал норвежец Софус Ли. Масштаб и глубина этих научных разработок, а также огромное влияние, оказанное ими на различные области математики, позволили Анри Пуанкаре сказать, что группы вмещают в себя всю математику. Однако в те времена никаких связей теории групп с физикой видно не было, так что еще в 1900 году Джеймс Джинс, говоря о математических дисциплинах, которые полезно знать физикам, утверждал, что

> "теорию групп можно смело исключить, потому что никакой пользы от нее физике никогда не будет".

Но случилось все наоборот: систематическая классификация симметрии и ее канонизация в теории групп – эго в огромной степени основа современной фундаментальной физики. Природа любит симметрию, и поэтому теория групп играют большую роль в ее описании. Гильбертовы пространства

Гильбертовы пространства

Физика XX века отмечена двумя великими теориями. Первая из них, общая теория относительности, как мы уже видели, обязана существованием развитию неевклидовой геометрии и тензорного исчисления. Вторая, квантовая механика, перед математиками в не меньшем долгу. Повивальной бабкой в данном случае, сам того не желая, выступил Давид Гильберт. В свое время он предложил идею построения бесконечномерных версий евклидова пространства. Сейчас такие пространства называют гильбертовыми. Гильбертово пространство обладает тем свойством, что каждая его точка находится во взаимно-однозначном соответствии с множеством математических операций определенного типа. Эти пространства образуют базис математического аппарата теории квантовой механики и большинства современных концепций элементарных частиц. В основном абстрактно-математическая теория гильбертовых пространств была разработана в начале XX века, а физики начали пользоваться ею примерно 20 лет спустя, когда полностью формализовалась квантовая революция, которую возглавляли Бор, Гейзенберг и Дирак.

Сложные многообразия

Интерес к теориям суперструн как кандидатам па роль "теории всего" заставил физиков вновь углубиться в учебники математики. В данном случае им нужны были идеи, относящиеся к структуре сложных многообразий, и другие доступные лишь немногим посвященным абстрактно-математические

обобщения более известных концепций. Однако в книгах ничего подходящего не обнаружилось. Физики впервые в современной истории натолкнулись на недостаточность существующих математических разработок, и математикам было поручено срочно приступить к работе по востребованным направлениям.

Те разделы математики, которые необходимы для дальнейшей разработки концепции струн как наиболее фундаментальных сущностей физического мира, находятся на самом переднем крае математической науки. Мало кто из физиков способен до конца в них разобраться, и форма, в которой математики представляют свои находки, часто приводит физиков в отчаяние. Последним эти результаты нужны в таком виде, чтобы их можно было использовать в работе. Зачастую для этого требуется интуитивное понимание рассматриваемого вопроса, и здесь на помощь приходит разработка достаточно простых примеров, иллюстрирующих используемые абстрактные понятия. Математики же, со своей стороны, в стремлении к максимальному абстрагированию и обобщению нередко сторонятся частностей. Хотя математик тоже может первоначально отталкиваться от конкретных примеров, пытаясь на ранних этапах предугадать вероятную истинность или ложность каких-то очень общих утверждений, но эти предварительные или промежуточные шаги остаются за кадром, когда дело доходит до публикации окончательных результатов. В итоге получается, что научная математическая литература практически закрыта для непосвященных. Результаты исследований представлены как иерархия определений, теорем и доказательств – по образцу Евклида. Это позволяет избежать ненужного многословия, но в то же время уж слишком маскирует естественный ход мыслей математика. Во многом столь печальное положение вещей связано с деятельностью группы французских математиков, взявших себе псевдоним Николя Бурбаки. За последние полвека они в соавторстве написали целую серию монографий, посвященных фундаментальным структурам математики. Их деятельность – последняя надежда формалистов: превалируют аксиоматика, строгость и элегантность рассуждений и доказательств; напрочь исключены рисунки, схемы, примеры и частности. Хотя опубликованные тома не содержат каких-то новых математических результатов, в них известные предметы излагаются по-новому, в более абстрактном стиле. Для знатоков их книги -- верх совершенства. Впрочем, очень многие математики резко критиковали Бурбаки за "схоластичность" и "чрезмерную аксиоматику", но один из

бывших членов группы, Лоран Шварц, пытается следующим образом оправдать ее методику и возникающий контраст:

> "Есть, по существу, два типа ученых умов, и ни один из них не лучше и не хуже другого. Есть те, кто любит мелкие детали, и те, кого интересуют максимальные обобщения... При разработке новых математических теорий лед обычно проламывают ученые “детальной” школы, которые подходят к решению проблем, используя нестандартные методы, формулируют важные вопросы, требующие ответа, упорно ищут решения, зачастую преодолевая огромные трудности. Когда их задача выполнена, на передний план выступают идеи ученых, склонных к обобщениям. Они все сортируют, просеивают, оставляя только то, что необходимо для будущего математики. Работа у них скорее педагогическая, нежели творческая, но она не менее важна и тяжела, чем труд первооткрывателей альтернативных теорий.... Бурбаки принадлежат как раз к этой “общей” школе мысли".

Однако сегодня на лицо тенденция отхода от этого крайнего формализма. Математики обращаются к изучению конкретных проблем, особенно тех, что связаны с хаотичными нелинейными феноменами, и ищут мотивы для деятельности в мире природы. На самом деле это возврат к былой традиции, поскольку наряду с примерами использования старой математики в новой физике есть немало примеров того, как физические исследования мотивировали рождение новых математических теорий. Наблюдения за непрерывным движением тел и желание объяснить понятие мгновенной скорости изменения величин привели Ньютона и Лейбница к созданию математического анализа. Предпринятое Жаном Батистом Фурье исследование тригонометрических рядов, ныне носящих его имя, было откликом на исследования в области теплообмена и оптики. В XX столетии рассмотрение импульсивных сил привело к рождению нового математического понятия, названного обобщенной функцией. Эти функции особенно активно использовались Полем Дираком в формулах квантовой механики, а затем были аксиоматизированы и обобщены как ответвление чистой математики. Эту эволюцию обессмертил в первом учебнике, посвященном данному предмету, Джеймс Лайтхилл, который посвятил свой труд Дираку, Лорану Шварцу (давшему строгое математическое обоснование понятиям, которые Дирак использовал скорее интуитивно) и Джорджу Темплу (объяснившему логическое здание, построенное Шварцем, простым и доступным языком – для тех, кто хотел этим пользоваться). Вот как выглядит это посвящение в учебнике Лайтхилла:

"Полю Дираку, увидевшему, что это должно быть правдой. Лорану Шварцу, это доказавшему. И Джорджу Темплу, показавшему, насколько это может быть просто".

В последнее время тенденция к изучению конкретных приложений укрепилась благодаря созданию масштабной теории динамических систем вследствие изучения турбулентных потоков и особенно – концепции странного аттрактора. Растущий интерес к описанию хаотических преобразований, которые характеризуются очень быстрой эскалацией любых ошибок и погрешностей в их описании, привел к совершенно новой философии математического представления явлений. Вместо того чтобы искать все более точные математические уравнения для описания данного процесса, исследуют свойства, которыми обладают почти все возможные уравнения, выражающие суть преобразований. На такие обобщенные свойства можно положиться в том смысле, что они наверняка проявятся в феноменах, не отличающихся какой-то чрезмерной индивидуальностью. Последние с наибольшей вероятностью встречаются на практике.

Наконец, мы можем вернуться к вопросу о струнах и сложных многообразиях. Эта область физики, хоть ей и не хватает экспериментально проверяемых данных, показала направление к новым типам математических структур. Если теория суперструн сможет в не очень далеком будущем выдать какие-нибудь прогнозы, доступные прямому наблюдению, тогда мы станем свидетелями интереснейшего спектакля: чистая математика вновь получает заказы от экспериментальной физики. И даже если струны признают несостоятельными как инструмент описания физического мира элементарных частиц, математики продолжат заниматься этими исследованиями – чисто из интереса. Данная дисциплина подобна джинну, который, освободившись из бутылки, возвращаться назад никак не хочет.

Познаваемость мира

Говорят, что нужны три поколения, чтобы научиться гранить алмазы. Целая жизнь – чтобы научиться делать часы. И только три человека в целом мире до конца понимают теорию относительности Эйнштейна. Но все до одного тренеры NFL убеждены в том, что ничто из перечисленного не сравнится по сложности с игрой в позиции полузащитника.

Из статьи спортивного обозревателя "Los Angeles times"

Одна из самых поразительных особенностей мироздания заключается в том, что физические законы выглядят сравнительно простыми, тогда как множество состояний и ситуаций, в которых мир предстает перед нами, являются чрезвычайно сложными. Чтобы ликвидировать этот диспаритет, мы должны пересмотреть обсуждавшуюся нами в главе 6 резкую границу между законами природы и результатами их действия, физическими уравнениями и их решениями. Тот факт, что результаты действия физических законов совсем не обязаны обладать симметрией, которой обладают сами законы, весьма затрудняет научные исследования и объясняет, что сложнейшие структуры, наблюдаемые нами во Вселенной, могут быть следствием очень простых законов преобразований и инвариантностей. Однако, какими бы необходимыми ни представлялись эти соображения для познания, достаточными они никак не являются.

На первый взгляд можно подумать, что миру было бы проще стать непознаваемым хаосом, нежели относительно упорядоченным космосом, тайны которого постепенно открывают ученые. Какие особенности мироздания играют наиболее важную роль, делая его познаваемым для нас? Ниже приводится перечень характеристик, явно или косвенно обеспечивающих рациональную познаваемость (интеллигибельность) природы.

Линейность

Линейные задачи – легкие. Это задачи, где сумма или разность решений тоже являются решениями. Если L – линейная операция и при воздействии на величину A получается результат a, а при воздействии на величину B получается результат b, то результатом воздействия на A плюс B

будет *a* плюс *b*. Таким образом, если ситуация является линейной или подвергается линейному воздействию, существует возможность составить представление об общей картине, рассматривая ситуацию по кусочкам и складывая их воедино. Целое получается в точности равным сумме частей. К счастью для физиков, мир в большей своей части линеен, а потому возможно допускать небольшие ошибки в отношении поведения объектов, и накопление погрешностей с течением времени будет очень медленным. Таким образом, линейные феномены поддаются очень точному математическому моделированию. Результаты линейных операций меняются равномерно и сообразно изменению входящих данных. Нелинейные проблемы – совсем другое дело. Последствия ошибок нарастают так стремительно, что малейшая неопределенность в текущем положении вещей делает любые прогнозы даже на самое ближайшее будущее совершенно бесполезными. Мизерные изменения вводных данных приводят к совершенно непредсказуемым результатам. Нет никакой возможности сложить цельную картину из частных локальных решений. Здесь требуется иной, холистический подход, где система рассматривается как нечто большее по сравнению с суммой составляющих ее частей. Нам знакомы многие из этих проблем: поток воды из крана, развитие экономики и человеческих сообществ, изменения погоды – о целом нельзя судить по отдельным факторам. Однако в образовании и в интуитивном знании доминируют примеры линейных систем – потому что они простые. Нас учат решать линейные уравнения и системы, учебники рассказывают о линейных феноменах. Они не представляются сложными для понимания. Многие социологи и обществоведы, анализируя поведение социальных групп, предпочитают обращаться к линейным моделям, потому что в них легче разобраться и о них легче рассказывать другим. Ведь даже самые простые нелинейные уравнения, какие только можно придумать, содержат в себе неожиданные загадки и с практической точки зрения являются совершенно непредсказуемыми.

Несмотря на вездесущность сложных нелинейных систем, фундаментальные законы природы зачастую порождают феномены, которые можно квалифицировать как линейные. Так, если мы имеем физический феномен, который можно описать действием математической операции *f*, воздействующей на аргумент *x*, что обозначается как *f (x)*, тогда в общем и целом феномен можно выразить в виде следующего бесконечного ряда:

$$f(x) = f_o + xf_1 + x^2 f_2 + \ldots$$

Если $f(x)$ – феномен линейный, тогда его можно с большой точностью аппроксимировать первыми двумя членами ряда в правой части уравнения; остальные члены ряда либо равны нулю, либо уменьшаются так быстро, что их влиянием можно пренебречь. К счастью, этим свойством обладает большинство физических феноменов, что чрезвычайно важно с точки зрения познаваемости мира и тесно связано с другими аспектами действительности, самые значительные из которых рассмотрены ниже.

Локальность

Признак целиком неквантового мира – события, происходящие здесь и сейчас, напрямую вызываются соседними во времени и пространстве событиями. Это свойство мы называем локальностью, или близкодействием, имея в виду, что именно ближайшие события оказывают на нас наибольшее воздействие. Обычно для того, чтобы физический закон обладал данным свойством, необходима еще и линейность, хотя ее одной недостаточно, чтобы гарантировать локальность. Фундаментальные силы природы, такие как тяготение, уменьшаются по мере удаления от источника, и скорость процесса такова, что каждая точка Вселенной испытывает на себе наибольшее воздействие со стороны именно соседних точек, а не тех, что расположены на другом краю мира. Будь ситуация обратной, мир находился бы во власти непредсказуемых влияний из дальних концов Вселенной, и наши шансы разобраться что к чему сошли бы на нет. Интересно, что число развернутых измерений пространства играет важную роль в обеспечении такого положения вещей. От этого зависит также когерентность волновых феноменов. Если бы наше пространство было четырехмерным, тогда скорость распространения волн в пустоте не была бы одинаковой, и мы одновременно получали волны, испущенные в разные моменты времени. Помимо того, в любом мире, кроме трехмерного, волны искажались бы в процессе перемещения. В таких условиях точная и надежная передача сигналов становится невозможной. А поскольку в физическом мире очень многое зависит от передачи волн, будь они мозговые или квантовые, мы можем по достоинству оценить, какую важную роль играет размерность нашего пространства для обеспечения познаваемости мира.

Свойством локальности обладает не каждое природное явление. Обратив взор на квантовый мир элементарных частиц, мы можем обнаружить, что он не локален. Об этом гласит знаменитая теорема Белла. Она указывает на наличие некоей двусмысленности, возникающей в отношениях между наблюдателем и объектами, когда исследования

проводятся в квантовом мире очень малых объектов, которые неизбежно находятся под влиянием самого акта наблюдения. В нашем повседневном опыте такой квантовой неопределенности нет. Положение объекта в пространстве и его скорость определяются совершенно четко, недвусмысленно и независимо от того, кто им пользуется. Но тот факт, что наша сегодняшняя Вселенная допускает такую определенность, сам по себе представляется таинственным. Если мы оглянемся на первые мгновения Большого взрыва, то увидим квантовый мир, описанный в главе 3. Из того состояния, где причинно-следственные связи не работали, должен был как-то образоваться мир, в котором мы живем, где результаты большинства наблюдений являются вполне определенными. Это может означать, что Вселенная возникла из какого-то особенного первобытного состояния. Связь между локальным и глобальным

Благотворное присутствие свойств линейности и локальности в мире повседневного опыта является необходимым для понимания мирового устройства. Такое понимание начинается с отыскания локальных причин для локальных последствий. Но нужно еще иметь возможность сложить из локальных кусочков целую, глобальную картину мира. В некотором смысле она должна строиться из многих копий локальных структур. Иначе говоря, в мире должны иметь место инвариантности, которые остаются неизменными, когда мы меняем положение всех наиболее фундаментальных сущностей мироздания во времени и пространстве; нужно, чтобы самая базовая ткань реальности была универсальной, не зависящей от местных условий. Специалисты по элементарным частицам обнаружили, что по какой-то загадочной причине мир устроен именно таким образом, и о силе этой связи между локальностью и глобальностью свидетельствуют калибровочные теории, с которыми мы познакомились в начале главы 4. Требование наличия этой взаимосвязи является необходимым условием существования наблюдаемых физических взаимодействий. Ситуацию следует понимать отнюдь не в телеологическом смысле. Это всего лишь отражение естественного порядка вещей.

Если критически взглянуть на математические структуры, наиболее эффективно описывающие мир, и задаться вопросом, почему они существуют, мы обнаружим там очень тонкий нюанс. В них есть математические операции, такие как показанное выше разложение функции в ряд или теорема о неявной функции, которая гарантирует, что если какая-то величина полностью определяется значениями двух переменных x и y и при этом оказывается константой, тогда y всегда можно представить как

функцию одной переменной x. Оба математических свойства накладывают ограничения на локальную информацию о мире, которая может быть выведена из глобальной. Применяя эти локальные ограничения снова и снова по итерационной схеме, мы можем накапливать все больше глобальной информации о математической вселенной. Существуют и обратные примеры. Знаменитая интегральная теорема Стокса и процесс аналитического продолжения, известные любому студенту, являются иллюстрациями того, как накладываются ограничения на переход от локальной информации к глобальной. Они обнаруживают одну из целей исследования природы человеком: расширить знания о мире, двигаясь от того, что уже известно, к тому, в чем мы еще невежды. Теорема Стокса не допускает подобного расширения знаний без появления неопределенности, двусмысленности. Неопределенные величины констант к концу процесса расширения знаний так и останутся неопределенными. Сила калибровочных теорий основывается на их способности устранить эту произвольность и определить неизвестную константу единственным образом через наложение требований симметрии и инвариантности.

Все лучшие физические теории ассоциируются с уравнениями, которые допускают прогнозирование на будущее данных, определенных в настоящем. Но ситуация требует, чтобы пространство и время обладали особым математическим свойством, которое называют естественной структурой. Другие концепции, пытающиеся использовать математику для прогнозирования, в том числе те, которые описывают статистические или вероятностные результаты, зачастую не обладают такого рода математическим субстратом с естественной структурой, и потому нет гарантий, что их будущие состояния станут гладким продолжением текущих.

Элементарные частицы имеют особенность, совершенно неожиданную в сравнении с нашим обыденным опытом. Речь идет о том факте, что мир населен популяциями совершенно идентичных элементарных частиц. Все электроны, откуда бы они ни были родом – из дальнего космоса или из физической лаборатории, – имеют (в пределах точности измерений) одинаковый электрический заряд, спин и массу. Они все ведут себя совершенно идентично во взаимоотношениях с другими частицами. И такая устойчивость характерна не только для электронов: то же самое можно сказать о популяциях всех прочих элементарных частиц, от кварков и лептонов до частиц-посредников, обеспечивающих четыре фундаментальных взаимодействия. Мы не знаем, почему так происходит. Попробуйте вообразить мир, где электроны – как футбольные мячи – все

похожи, но каждый в какой-то мелочи отличается от всех остальных. В результате мы получили бы непознаваемый мир.

Более того, даже в мире, населенном популяциями тождественных элементарных частиц, не могли бы существовать популяции идентичных систем большего масштаба в отсутствие какой-либо квантизации энергии. Хотя часто говорят о неопределенности, свойственной квантовой картине мира, квантовая структура абсолютно необходима для стабильности, цельности и познаваемости физического мира. В ньютоновском мире все физические параметры, такие как энергия и спин, теоретически могут принимать любые значения, варьируясь по всему числовому континууму. Предположим, нам удалось создать "ньютоновский атом водорода" и заставить электрон кружиться вокруг протона. Тогда радиус его орбиты можно сделать любым, поскольку в наших силах придать электрону какую угодно орбитальную скорость. Вследствие этого всякая пара электрон – протон хоть немного, но отличалась бы от всех прочих таких же пар. Электроны могли бы находиться на любых случайным образом занятых орбитах. Химические свойства атомов были бы разными, впрочем, как и размеры. Если, допустим, создать популяцию атомов, где скорости и радиусы орбит электронов первоначально будут совершенно одинаковыми, постепенно между ними неизбежно возникнут различия под воздействием радиации и других частиц. Таким образом, даже при наличии универсальных популяций идентичных электронов и протонов водород, каким мы его знаем, с четко очерченными и устойчивыми химическими свойствами, существовать бы не мог. Квантовая механика объясняет причины, по которым имеют место идентичные комплексные структуры. Квантизация энергии позволяет им существовать отдельными, дискретными "пакетами", и когда электрон встречается с протоном, он может запять не произвольную, а одну-единственную орбиту. Это относится ко всем парам электрон – протон. Такое универсальное взаимное состояние мы и называем атомом водорода. Кроме того, свойства атома водорода, когда он уже образовался, не подвергаются постепенным мелким пертурбациям. Чтобы изменить орбиту электрона вокруг протона, воздействие должно быть достаточно сильным, способным обеспечить квантовый переход, то есть изменить энергетику всего квантового "пакета". Таким образом, квантизация энергии обусловливает повторяемость структур в физическом мире и высокую степень идентичности одноименных элементарных частиц. Без квантовой неопределенности, имеющей место на микроуровне, макромир был бы

непознаваемым – да его вообще не было бы кому познавать в том сумбуре, который существовал бы в неквантовом мире.

Симметричность

Возможности элементарных частиц Вселенной неотделимы от обеспечения различных форм симметрии. Сохранение некоего общемирового порядка в сочетании с локальной свободой перемен и преобразований поддерживается соответствующими законами природы, которые можно переформулировать на языке различных сохраняемых инвариантов. Возникающие частные конфигурации порождаются разнообразными последовательностями конечного числа ингредиентов. Например, ряд различных конфигураций можно получить, комбинируя вращения и прямолинейные перемещения в пространстве. Чем больше число допустимых преобразующих операций (генераторов), тем больше получается конфигураций. Если это число очень велико, то с практической точки зрения можно говорить об отсутствии симметрии как таковой. Генераторы симметрий, диктующие допустимые взаимодействия между элементарными частицами, эквивалентны частицам-посредникам, обеспечивающим эти самые взаимодействия. Следовательно, познаваемость мира обусловлена фактом немногочисленных типов элементарных частиц. Они исчисляются десятками, а не тысячами или миллионами.

Существует даже более глубокая связь между элементарными частицами и общей простотой мироздания. Обсуждавшееся потенциальное объединение физических сил полагается на свойство асимптотической свободы, которая проявляется через сильное взаимодействие между такими частицами, как кварки и глюоны, несущие "цветовой заряд". Это означает, что по мере нарастания энергии взаимодействия между частицами сила их связи уменьшается, так что асимптотически они освобождаются от взаимовлияния. Именно это свойство позволяет в условиях высоких энергий объединить различные фундаментальные взаимодействия, которые при низких энергиях видятся не связанными между собой. Однако такое свойство не могло бы иметь место, если бы типов элементарных частиц было слишком много. Например, если бы было восемь типов нейтрино вместо тех трех, что экспериментально обнаружены, взаимодействия в условиях высоких энергий становились бы сильнее, а не слабее, и мир в результате был бы неизмеримо более сложным.

Этот перечень качеств, которые могут быть необходимыми для познания мира, ни в коем случае не претендует на статус исчерпывающего и

окончательного. Это не более чем иллюстрация. От внимания читателя наверняка не ускользнет то обстоятельство, что многие из упомянутых свойств одновременно являются необходимыми для существования во Вселенной устойчивых сложных систем, к которым относится и то, что мы называем жизнью. Нетрудно придумать миры, где живые наблюдатели (пусть даже совсем не похожие на нас) не могли бы существовать, и подобные игры разума довольно неожиданно обнаруживают тесную связь между самыми фундаментальными элементами Вселенной и условиями, при которых вероятность эволюции жизни была бы отлична от нуля.

Еще раз об алгоритмической сжимаемости

Мозг – замечательный орган. Он начинает работать в момент пробуждения утром и не прекращает, пока вы не доберетесь до места работы.

Роберт Фрост

По существу, все обсуждавшиеся необходимые условия познаваемости мира сводятся к тем, которые позволяют придать хоть какой-то смысл тому, что в противном случае выглядело бы полнейшим хаосом. Имеется в виду, что мы каким-то образом упорядочиваем наблюдаемые явления, отыскиваем определенные закономерности, общие множители, взаимосвязи, объясняющие, почему какие-то вещи устроены так, а не иначе, и что будет с ними потом. Иначе говоря, все исчерпывается поиском возможностей алгоритмического сжатия (с этим понятием мы уже знакомились в главе 1).

На практике рациональная познаваемость мира сводится к его алгоритмическому сжатию. Мы имеем возможность заменить цепочки фактов и наблюдаемых данных более короткими утверждениями, имеющими такое же информационное содержание. Некоторые из таких сокращений мы называем физическими законами. Если бы мир не был алгоритмически сжимаемым, тогда и законов в нем не было бы. Вместо того чтобы использовать для расчета орбит планет закон всемирного тяготения,

мы вынуждены были бы вести точный и кропотливый учет позиций планет во все прежние времена, однако даже это не позволило бы нам предсказать положение планет на какой бы то ни было будущий момент времени. Мир потенциально и фактически познаваем потому, что достаточно сильно сжимаем алгоритмически. Именно поэтому возникает возможность описывать физический мир математически. Математика представляет собой наиболее удобный язык для выражений всех обнаруживаемых алгоритмических сжатий.

Однако не весь мир алгоритмически сжимаем. Ему не поддаются определенные хаотические процессы, как расчету некоторые математические операции. Глядя на них, мы можем представить, как выглядел бы абсолютно несжимаемый мир. Тогда исследователи были бы не математиками, а скорее библиотекарями, составляющими гигантские каталоги всех наблюдаемых фактов и явлений, никак не связанных между собой.

Мы смотрим на науку как на поиск алгоритмических сжатий чувственно воспринимаемого мира, и глубокая вера ученых в то, что фундаментальная структура Вселенной в целом является алгоритмически сжимаемой, подвигает их на поиски единой и всеобъемлющей "теории всего". И наш разум играет здесь не последнюю роль. Тесно связана с видимой алгоритмической сжимаемостью мира способность человека эти операции осуществлять. Наш мозг сформировался из элементов физического мира и приобрел нынешнее состояние в процессе естественного отбора и эволюции. Эффективность разума как инструмента восприятия окружающего мира и выживание человека как вида очевидным образом связаны с его способностью производить алгоритмические сжатия. Чем лучше мы запоминаем и кодируем переживания, тем эффективнее противостоим опасностям окружающей среды, которые в противном случае были бы совершенно непредсказуемыми. На самой последней стадии эволюционной истории, когда мы уже превратились в Homo sapiens, это умение разума достигло значительных высот. Мы способны мыслить о самом мышлении. Мы не просто учимся на непосредственном опыте, но можем моделировать или воображать результаты поступков. В этом режиме мозг генерирует имитации прошлых переживаний, помещая их в новые ситуации. Но, чтобы справиться с такой задачей, он должен быть достаточно тонко организован. Ясно, что для эффективного осуществления алгоритмического сжатия необходимо, чтобы умственные способности были выше определенного порога. Наши органы чувств должны улавливать необходимую информацию

из окружающей среды. Но понятно также, почему обострением чувств нельзя слишком увлекаться. Если бы мы воспринимали из окружающего мира все, что только можно увидеть и услышать – вплоть до тонкостей атомной структуры вещей, – информация мгновенно переполнила бы мозг. Резко замедлилась бы ее обработка, а значит, затормозились бы и наши реакции на происходящее.

Тот факт, что человеческий разум не слишком амбициозен в плане сбора информации и ее обработки, означает, что он осуществляет алгоритмическое сжатие данных, даже если они по природе своей не очень-то и сжимаемы. На практике это делается путем усечения поступающей информации. Наши органы чувств сами по себе способны воспринимать такое-то количество информации с таким-то разрешением и такой-то чувствительностью. Даже если мы используем искусственные вспомогательные средства типа телескопов и микроскопов, чтобы расширить возможности наблюдения, фундаментальные ограничения на степень познаваемого все равно остаются. Часто сам процесс усечения информации формализуется в виде отрасли прикладной научной дисциплины. Хороший пример – статистика. Когда мы изучаем крупные или очень сложные феномены, можно попытаться алгоритмически сжать информацию, определенным образом выбрав из общего объема какую-то ее часть. Таким образом, например, пытаются зондировать общественное мнение перед выборами: вместо того чтобы спрашивать у каждого гражданина, за кого он будет голосовать, делают репрезентативную выборку, опрашивают эту группу людей и получают, как правило, достаточно точный прогноз результатов выборов.

Непрерывность или дискретность?

Наблюдатели, как правило, вычислительно эквивалентны тем системам, за которыми наблюдают. Вследствие этого поведение таких систем им неизбежно кажется сложным.

Стивен Вольфрам

Физика и физико-математическое описание природы более 300 лет двигались по пути, который проложил Исаак Ньютон. Предполагалось, что пространство и время непрерывны и лучше всего описываются соответствующими системами дифференциальных уравнений и другими математическими операциями. Непрерывное изменение какой-либо величины иллюстрируется кривой, которую можно провести, не отрывая карандаш от бумаги. Все известные законы физики математически представляют собой дифференциальные уравнения. Предполагается, что и "теория всего" будет описываться дифференциальными уравнениями. Их можно уподобить машинам, которые предсказывают будущее на основе известного настоящего. Но если мы посмотрим на них более критично, то увидим, что они основываются на множестве критически важных допущений, касающихся природы Вселенной. Если задуматься над тем, как одно множество, содержащее всевозможные числа, можно преобразовать в другое, также содержащее все мыслимые числа, то допущение непрерывности подобных преобразований сокращает число возможностей на бесконечную величину. Мир, допускающий дискретные преобразования наряду с непрерывными, бесконечно более многообразен с точки зрения открывающихся в нем возможностей преобразований местоположения и времени. На практике нельзя отличить непрерывное пространство-время от прерывистого, или дискретного, потому что у нас нет возможности разбить его на произвольно малые расстояния и интервалы времени. Поэтому физики сохраняют привязанность к дифференциальным уравнениям и продолжают предполагать, что пространство- время представляет собой континуум, на какие малые части его ни дроби.

Последние несколько лет Стивен Вольфрам кропотливо исследует альтернативную точку зрения: мир в конечном счете дискретен, а непрерывным мы его считаем только в силу привычки, а также потому, что уравнения математической физики были придуманы раньше компьютеров.

При помощи созданного им прикладного пакета "Mathematica" он изучает всевозможные правила дискретных преобразований, при которых изменения в состоянии каждой ячейки системы предопределяются состояниями соседних ячеек. Программа "Mathematica" не просто считает подобно большому калькулятору, она позволяет манипулировать также символами и работать с алгебраическими выражениями. На первый взгляд задача кажется сложной. Хотя число возможных правил трансформаций такого рода является конечным, можно предполагать, что диапазон возможных результатов фантастически огромен. Вольфрам использовал имевшиеся в распоряжении вычислительные мощности на полную катушку, систематически перебирая все возможные правила.

Итоги столь амбициозного проекта стали неожиданными для всех. Выяснилось, что при всем многообразии частных конфигураций, возникающих при различных изменениях правил перехода, принципиально различных типов поведения систем наблюдается всего четыре: либо система быстро затухает, либо мечется туда-сюда между несколькими простыми состояниями, либо безгранично расширяется, либо переходит в случайное состояние максимальной сложности.

Можно было бы предположить, что введение более сложных правил перехода, даже применение правил, использующих усредненную информацию из многих соседствующих ячеек текущего поколения для расчета следующей итерации в каждой ячейке, должно привести к появлению более экзотических возможностей. Вольфрам исследовал многие из этих альтернатив, а также множество общих систем эволюции и пришел к поразительному выводу: существенно более сложные формы поведения по сравнению с уже перечисленными в первом каталоге простых преобразований так и не возникают. При увеличении размерности пространства, чтобы у каждой ячейки было больше соседей, и еще большем увеличении числа возможных правил перехода поведение систем оставалось прежним. Никакого существенного всплеска сложности не наблюдалось.

Все это несколько неожиданно. Создается впечатление, что в вычислительных системах может существовать некий максимальный уровень сложности, который достигается очень быстро и повсеместно даже при самом простом наборе правил преобразований. Это поднимает ряд новых проблем в плане биологического исследования причин возникновения сложных живых систем, в том числе вопрос о том, можно ли объяснить

эволюцию сложных живых систем одним лишь естественным отбором. Наблюдения Вольфрама указывают на то, что системы, следующие простым правилам преобразований, быстро достигают максимального уровня сложности и все сложные механизмы, наблюдаемые в природе (включая нас самих), эквивалентны в каком-то фундаментальном процессе достижения максимально возможной сложности.

Так мы подходим к принципу вычислительной эквивалентности, согласно которому каждый компьютер – включая "машины" природные, такие как мы с вами, – имеет тот же максимальный уровень сложности, что и окружающая их среда. Вследствие этого сознательно мыслящие компьютеры склонны трактовать изучаемые ими системы как сложные. Им не приходилось иметь дело ни с чем существенно более сложным, чем окружающий мир. И не важно, похожа ли мыслящая техника на нас с вами. Будь то наноскопические существа или великаны с гигантским мозгом, качественно их сложность примерно одинакова.

Если это правда, то удивляет еще одно обстоятельство. Хотя естественно было бы ожидать, что человеческий мозг должен быть сложнее, нежели простые комплекты правил изменения одного набора нулей и единиц в другой, получается, что это совсем необязательно. Достижимый уровень сложности насыщается уже игрой с простыми правилами, такой как "Жизнь" Джона Конвея. Попытки объяснения сложных структур через естественный отбор тоже имеют свои последствия. Считается, что эволюция очень сложных систем требует значительных "усилий" и времени. Однако вполне может статься, что значительная часть любого наблюдаемого сложного порядка возникает всего лишь как побочный продукт простых правил, без какого-либо влияния естественного отбора. Вот что об этом говорит Вольфрам, имея в виду возникновение сложных биологических систем:

> "Я почти убежден, что главный эффект естественного отбора является почти что противоположным: биологические системы бегут от сложности... В тех случаях, когда естественный отбор является важным определяющим фактором, я подозреваю, что всегда можно наблюдать те же самые упрощающие черты, что и в системах, создаваемых искусственно. И только тогда, когда естественный отбор не играет критической роли, биологические системы способны являть тот же уровень сложности, какой мы наблюдаем, к примеру, во многих физических системах".

В этом амбициозном сценарии есть одна странность. Цель была – показать, что существует возможность заменить описания физических законов, основанных на непрерывных дифференциальных уравнениях, дискретными моделями, использующими разностные уравнения. Последние удобнее обрабатывать при помощи компьютеров; более того, если вы хотите решить дифференциальное уравнение на компьютере, необходимо в качестве первого шага преобразовать его в разностное уравнение. Однако есть один важный раздел физики, который будто не поддается подобной замене. Квантовая теория по природе своей нелокальна, а это значит, ее нельзя заменить моделью, в которой то, что наблюдается в одном месте, предопределяется только тем, что происходит по соседству. В квантовой Вселенной имеют место таинственные дальнодействующие связи.

Тайна вселенной

Этот принцип настолько общий, что никакие частные приложения его невозможны.

Дьёрдь Пойа

Если не существует возможности алгоритмически сжать последовательность данных, естественно считать ее случайной. Однако в принципе невозможно доказать, что такая-то последовательность является случайной, в то время как неслучайность доказывается нахождением возможности сжатия. Следовательно, мы никогда не сможем доказать, что итоговую сумму информации, содержащейся во всех физических законах, реально выразить в какой-то более лаконичной форме, которую условимся называть "тайной Вселенной". Разумеется, никакой тайны может и не быть. Даже если она есть, ее информационное содержание может быть зарыто так глубоко, что на извлечение этой тайны потребуется слишком много (или даже бесконечно много) времени.

Вопрос о тайне Вселенной сводится к предмету о существовании некоего глубинного принципа, из которого проистекают все прочие знания о физическом мире. Несколько более слабой формой тайны было бы какое-то

одиночное суждение с последующим наибольшим объемом информации. Интересно поразмышлять о возможной форме такого суждения. Оно было бы из разряда "аналитических" или "синтетических" (в философском смысле)? Первое требует анализа, чтобы удостовериться в его истинности. Пример: "все холостяки не женаты". Ясно, что это суждение истинно, поскольку логично. Синтетическими называют осмысленные суждения, которые не являются аналитическими. Физические теории, которыми мы пользуемся для познания Вселенной, всегда синтетические. Проверить истинность того, о чем они сообщают, мы можем, лишь соотнося их с реалиями окружающего мира. Они не являются логически необходимыми. Они сообщают нечто об окружающем мире (в отличие от аналитических суждений, которые являются тавтологиями и никакой новой информации не несут). Некоторые ученые, ищущие "теорию всего", как будто бы надеются на то, что уникальность и полнота, присущие какой-то частной математической концепции, сделают ее единственным логически непротиворечивым описанием мироздания, и это качество превратит ее из синтетического суждения в аналитическое. Но если мы хотим, чтобы знание тайны Вселенной позволяло делать поддающиеся проверке прогнозы, это утверждение должно быть синтетическим. Однако это не вполне удовлетворительный вывод, потому что наша тайна тогда должна содержать какие-то составляющие, которые необходимо выводить из некоего еще более фундаментального принципа, а значит, это еще не главная тайна структуры Вселенной в целом, раз она содержит утверждения, требующие дальнейшего объяснения за счет какого-то более глубокого принципа.

Проблема переносится и на вопрос о роли математики в физике. Если все математические суждения являются аналитическими – тавтологическими следствиями из некоего набора правил и аксиом, – тогда получается, что мы пытаемся получить синтетические суждения об окружающем мире из чисто аналитических математических суждений. На практике, если начальные условия не уточняются какой-то формой самосогласованности, тогда именно они привносят синтетический элемент, который обязательно должен дополнять любую аналитическую математическую структуру, определяемую дифференциальными уравнениями. Даже такие схемы, как условие отсутствия границ, с которым мы знакомились в главе 3, попросту вводят какие-то новые "законы" в виде аксиом.

Что делает необходимые истины таковыми? Можно предположить, что это качество априорной познаваемости. Если нам приходится прибегать к каким-либо наблюдениям, чтобы проверить истинность суждения, значит,

мы познаем эту истину апостериори. Знаменитая философская дилемма – являются ли все априорные суждения аналитическими. Большинство суждений, с которыми мы сталкиваемся в жизни, – либо синтетические апостериори, либо аналитические априори. Но существуют ли неаналитические суждения, имеющие реальное информационное наполнение и при этом априори являющиеся познаваемыми? Возможна ли синтетическая априорность? Как мы можем знать, что такое-то утверждение сообщает нам нетривиальную информацию о мире, пока не сверим его с новыми наблюдениями? Традиционно философы, склонные к эмпиризму, придерживаются убеждения, что синтетические априорные истины существовать не могут, тогда как рационалисты утверждают обратное, хотя и не могут прийти к согласию на предмет того, что эти истины из себя представляют. С тех пор как Иммануил Кант ввел разграничение между аналитическими и синтетическими суждениями, все кандидатуры на статус синтетических априорных истин – такие как "параллельные линии никогда не пересекаются" или "каждое явление имеет причину", считавшиеся безусловно истинными до прихода неевклидовой геометрии и квантовой теории, – впоследствии были отвергнуты.

Так каким же образом мы могли бы иметь априорные синтетические знания о Вселенной хоть в какой-то форме? Кант предполагал, что человеческий разум так устроен, что естественным путем улавливает какие-то синтетические априорные аспекты мироздания. Хотя реальный мир обладает свойствами, которые невозможно вообразить, наш разум все же вычленяет из него определенные аспекты. Он словно смотрит на действительность через розовые очки и воспринимает ее отдельные грани, и такое знание оказывается одновременно синтетическим и априорным. Мы не способны понять то, что не зафиксировано в виде конкретных ментальных категорий, – это априорная истина. Поэтому для нас имеют место необходимые истины о наблюдаемом мире. Мы можем надеяться иным образом конкретизировать такого рода идею, приняв во внимание факт необходимости космологических условий существования наблюдателей во Вселенной. Эти антропные условия, о которых мы говорили ранее, указывают на определенные свойства, которыми Вселенная должна обладать априори, но они при этом достаточно нетривиальны, чтобы считаться синтетическими. Синтетическая априорность начинает приобретать вид требования, чтобы ни один познаваемый физический принцип, составляющий часть "тайны Вселенной", не отрицал возможность ее открытия. Наша Вселенная является элементом множества математических

концепций, но только те системы, которые достаточно сложны, чтобы содержать в себе подпрограммы, представляющие "наблюдателей", способны осуществиться как физическая реальность.

Является ли вселенная компьютером?

Математика – это часть науки, которой можно продолжать заниматься, даже если, проснувшись утром, вы обнаружите, что окружающий мир исчез.

Дейв Русин

В современной физике два важных вектора развития мысли. Они долгое время двигались параллельными курсами, но в последние годы наметилась их конвергенция. От обстоятельств этого схождения зависит, которая из них время спустя будет рассматриваться как всего лишь ответвление, "приток" другой. С одной стороны, мы имеем дело с верой ученых в законы природы, наделенные свойством симметрии, которая служит фундаментом логики Вселенной. Симметрии вписываются в картину мира как неделимые континуумы. Данному взгляду противопоставляется образ абстрактной вычислительной машины как самого фундаментального из всех понятий. Согласно этой картине мира, в основе мироздания лежит логика цифровая, то есть закономерность дискретных, а не непрерывных величин. Перед нами стоит грандиозная задача: мы должны решить, что фундаментальнее – симметрия или программа вычислений. Вселенная представляет собой космический калейдоскоп или космический компьютер? Она узор или программа? Или ни то, ни другое? Чтобы сделать выбор, необходимо знать, ограничены ли физическими законами возможности абстрактной вычислительной машины. Они ограничивают ее скорость и масштаб? Или наоборот, правила вычислений предопределяют возможные законы природы?

Прежде чем заводить разговор о том, как мало мы можем сказать о выборе, полезно вкратце рассмотреть историю вопроса. На протяжении веков превалировали те или иные взгляды на Вселенную. Эти ментальные

образы-парадигмы зачастую сообщают полезную информацию не столько об окружающем мире, сколько об обществе, где такие взгляды господствуют. Для древних греков, выработавших телеологический взгляд на мироздание на основе изучения живых существ, Вселенная представляла собой огромный живой организм. Для других, кто почитал геометрию превыше всех прочих наук, Вселенная была геометрической гармонией идеальных форм. Позже, когда появились первые механические часы, маятник качнулся в другую сторону: Вселенную стали сравнивать с механизмом, и религиозные апологеты ньютоновской картины мира устремились на поиски космического Часовщика. В эпоху промышленной революции взгляд на мироздание был неотделим от паровой машины и поднятых ею физических и философских вопросов, связанных с законами термодинамики и судьбой Вселенной. Таким образом, сегодняшнее сравнение Вселенной с компьютером кажется естественным продолжением ставшего уже привычным образа мышления. Завтра может появиться другая парадигма. Какая она будет? Существует ли какое-то глубокое и простое понятие, стоящее за логикой в том же самом смысле, как логика стоит за математикой и вычислениями?

На первый взгляд понятия симметрии и вычислительной математики кажутся слишком далекими друг от друга – и какой смысл делать выбор между ними? Но симметрии диктуют, какие преобразования могут иметь место во Вселенной. Тогда законы могут рассматриваться как своего рода программы, запущенные на некоем компьютере. Последним и является наша физическая Вселенная. При таком взгляде на вещи мы поддерживаем определенную точку зрения о взаимоотношениях между физическими законами и физической Вселенной, о чем уже шла речь в главе 2. Эти два понятия рассматриваются как разрозненные, независимые друг от друга. Легко представить, что та же самая программа запущена на совершенно другом компьютере. И здесь мы приходим к потенциальному конфликту с верой в реальность воплощения уникальной, единственной в своем роде "теории всего", которая соединяет условия существования элементарных частиц с управляющими ими законами.

Успех "непрерывной" точки зрения в объяснении свойств физического мира, на первый взгляд, будто не оставляет шансов дискретным, вычислительным теориям, цифровой физике. Но последние 15 лет логики объявили понятию континуума настоящую войну. Куайн, например, утверждает следующее:

"Как введение иррациональных чисел... представляет собой удобный миф, упрощающий законы арифметики., так и физические объекты являются постулированными сущностями, которые упрощают нам задачу описания потока бытия... Концептуальная схема физических объектов – удобный миф. Он проще, нежели буквальная истина, и содержит в себе буквальную истину в рассыпанной форме".

На данный момент мы все еще не придумали, какой вопрос нужно задать Вселенной, чтобы по ответу судить о том, действительно ли вычисления основательнее симметрии: можно ли, по словам Джона Уилера, получить "всё из бита". Лично я считаю, что этим надеждам не суждено осуществиться полностью. Чтобы быть уверенными в том, что вычисления представляют собой наиболее фундаментальный аспект реальности, мы должны потребовать от мира полной вычислимости. Все многообразие математических проявлений Вселенной необходимо уместить в прокрустово ложе конструктивистов. Таково наказание за отказ от континуума и использование вычислимых аспектов как основы для объяснения всего сущего. Однако открыто множество невычислимых математических операций, и многие из них принадлежат к той части дисциплины, которая в настоящее время необходима для понимания физического мироздания. Исследования, проводимые в рамках квантовой космологии, обнаружили примеры, где наблюдаемый параметр, согласно предсказаниям теории, должен иметь величину, равную бесконечной сумме переменных величин, которые должны измеряться на особого типа поверхности. Однако было доказано, что перечисление необходимых поверхностей является невычислимой операцией. Ее нельзя осуществить систематически через конечное число шагов на машине Тьюринга. Для генерации каждого следующего члена множества требуется элемент новизны. Разумеется, не исключено, что существует какой-то другой способ расчета, избавленный от необходимости прибегать к невычислимым операциям, но столь же вероятно, что такого пути нет. Имеются и другие проблематичные с точки зрения вычислимости качества дискретного мира.

Предположим, нужно решить обыкновенное дифференциальное уравнение

$$dy/dx = F(x, y).$$

На таких уравнениях, где $F(x, y)$ непрерывная функция x и y, строятся все физические теории. Выберем такую функцию $F(x, y)$, которая не является дважды дифференцируемой. Это означает, что, хотя мы можем провести

график функции *F*, не отрывая карандаш от бумаги (свойство непрерывности), кривая может иметь переломы и острые углы, наподобие того, что мы наблюдаем в вершине конуса. Таким образом, даже несмотря на то, что сама по себе функция *F* является вычислимой, решения данного дифференциального уравнения совсем не обязательно будут вычислимыми. Если рассмотреть дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие распространение любого рода волн, будь они квантовые или гравитационные, искривляющие геометрию пространства-времени, возникает та же проблема. Когда первоначальный профиль волны описывается непрерывной, но не дважды дифференцируемой функцией, могут не существовать вычислимые решения волнового уравнения в двух или более измерениях. Проблема коренится в недостаточной гладкости начального профиля. Если он является дважды дифференцируемым, тогда все решения волновых уравнений являются вычислимыми. Но если на самом фундаментальном уровне имеет место дискретность и разрывность, проблемы невычислимости не избежать.

Ответы на эти вопросы, если их можно найти, наверняка заключены в некоем расширении понятия, которое мы называем вычислением. Выясняется, например, что существует способ характеризации всех "плохих" дифференциальных уравнений наподобие того, что упомянуто выше, так что, в среднем, они вычислимы, даже если существуют худшие сценарии, где вычислимости нет. По традиции, специалисты-компьютерщики оценивают вычислительные возможности любого компьютера, реального или воображаемого, сравнивая их с возможностями идеализированной машины Тьюринга. Более того, от способностей такой машины зависит само значение, вкладываемое в понятие "вычислимый". Однако в последние годы стало ясно, что создание квантово-механических компьютеров вероятно. Тогда можно будет использовать квантовые неопределенности мироздания для выполнения операций, которые не под силу идеализированной машине Тьюринга. Поскольку мир представляет собой квантовую систему, любая попытка объяснить его внутреннее устройство на основе вычислительной парадигмы должна базироваться на твердом понимании сути квантовых вычислений: мы должны понимать, каковы особенности квантового компьютера и в чем он превосходит возможности машины Тьюринга. Во многих отношениях вычислительная парадигма является продолжением квантовой картины мира. В обоих случаях мир воспринимается как дискретный; обоим присущи дуальные аспекты, такие как эволюция и измерения (расчет и чтение информации). Но с другой стороны, еще больше

общего можно найти между квантовой картиной мира и природными симметриями. На протяжении полувека доскональных исследований квантовая теория и симметрии сосуществовали в нерушимом союзе. Каким будет статус вычислительной парадигмы, когда и на нее потратят столько же времени и энергии?

Непознаваемое

Я ненавижу цитаты. Говори то, что думаешь сам.

Ралф Уолдо Эмерсон

"Почему мир математический?" – спрашиваем мы. Если вдуматься, не так уж много математики вокруг нас. Она ограничивается описанием тайного скелетного мира, который, как мы думаем, скрывается за видимыми явлениями, мира значительно более простого, чем тот, что окружает нас в повседневной жизни. Мы не обнаруживаем никакой математики в эмоциях, суждениях, искусстве, музыке. Как же тогда нам провести разграничительную линию между эфемерными феноменами, где никакой математики и близко нет, и теми явлениями, которые должна охватить "теория всего" и ее математический аппарат? Что не может быть включено в понятие "все" с точки зрения физики? Такие вещи обязательно должны быть, но чаще всего их исключают на том основании, что они не "научные".

Мы все имеем представление, в каком направлении следует смотреть, чтобы обойти "теорию всего" стороной. Подсказка содержится в самой реакции человеческого разума, которому приходится иметь дело с огромным разнообразием информации. Вот что писал Хайнц Пагельс о том, насколько разнятся переживаемые им чувства при чтении "фактических" научных трудов от тех, что он испытывает, знакомясь с частными мнениями литературоведов:

> "Однажды я присутствовал на званом обеде в Нью-Йорке в окружении самых высокообразованных людей. Там были писатели, редакторы, интеллектуалы, но естественнонаучное сообщество представлял я один. Каким-то образом разговор закрутился вокруг

“Нью-йоркского книжного обозрения”, замечательного журнала, содержание которого отнюдь не ограничивается обзором новинок литературы... Мне это издание очень нравилось, и я всегда прочитывал его целиком... Однако была проблема, которой я поделился с соседями: я не мог вспомнить ничего из прочитанного в этом журнале. Информация, попадавшая в кратковременную память, в долговременную не переходила. Причина этого, решил я, заключалась в том, что, несмотря на замечательный стиль и занимательное содержание статей, в них на самом деле выражается не более чем личное мнение одного человека о поступках или мыслях других людей. Мне трудно запоминать частные мнения (даже собственные). Я привык фокусироваться на понятиях и фактах, инвариантах опыта, а не на эфемерах человеческих мнений, вкусов и стилей. Серьезным людям такие вещи неинтересны – разве что ради интеллектуальной разрядки.

После этих моих слов за столом повисла гнетущая тишина. Никто меня не поддержал. Пропасть между двумя культурами – естественнонаучной и гуманитарной – оказалась слишком большой. Я понял, что влез со своим уставом в монастырь других гостей и опорочил их святыни. Храмом этих людей как раз и являются мнения, вкусы и стиль, они обожают умные разговоры и интеллектуальные занятия как таковые, скорее, ради них самих, нежели приобретения знаний. Я попытался придумать какую-нибудь шутку, чтобы выбраться из этой неловкой ситуации, но не смог".

Мозг Пагельса привык определенным образом реагировать на различные типы входящей информации. В то время как фактические или логически структурированные данные хорошо укладываются в уже готовую систему обработки, для информации другого типа такой хорошо подготовленной почвы нет. Она не поддается сжатию в упорядоченную и легко запоминающуюся форму.

Мы уже видели, как мозг выполняет алгоритмическое сжатие доступной информации. Когда последовательность фактов поддается значительному алгоритмическому сжатию, мы находимся на полпути к созданию "науки". Ясно, что одни сферы жизненного опыта в большей мере подвержены такой сублимации по сравнению с другими. В "точных" науках самой важной характеристикой исследуемого предмета, способствующей алгоритмическому сжатию, является существование разумной идеализации сложных наблюдаемых феноменов, достаточно точно аппроксимирующей

реальное положение вещей. Если мы хотим разработать детальное математическое описание наблюдаемых характеристик типичной звезды, такой как Солнце, тогда наилучшей аппроксимацией будет рассмотрение Солнца как шара, имеющего одну и ту же температуру по всей поверхности. Разумеется, никакая звезда не является в точности сферической и поверхностно изотермической. Но все звезды достаточно похожи, чтобы можно было составить подходящий набор идеализаций, так что результирующее описание будет весьма точным. После этого идеализацию можно постепенно ослаблять и переходить к более реалистичному описанию, допускающему присутствие небольших нарушений сферичности, потом добавлять реализма в каком-то еще аспекте и т. д. Такая пошаговая последовательность уточняющих аппроксимаций к исследуемому феномену – это то, что называют вычислимой операцией в смысле Тьюринга. А вот многие науки, пытающиеся применять математику к таким вещам, как социальное поведение, бунты заключенных или психологические реакции, не в состоянии создать значительный объем точных знаний, потому что предмет их исследований не поддается очевидной и плодотворной идеализации. Сложные феномены, особенно те, которые обладают алгоритмически несжимаемыми аспектами или (как личное мнение) являются по природе непредсказуемыми, потому что реагируют на сам процесс исследования, невозможно заменить последовательностью простых аппроксимаций. Трудно представить, как может выглядеть "аппроксимация общества" или "аппроксимация паранойи". Эти феномены не позволяют эффективно пользоваться самым успешным методом обработки данных сложных систем.

На практике причина может быть в том, что мы не умеем подобрать ключ к поиску идеализации или рассматриваемому вопросу внутренне присуща алгоритмическая несжимаемость. Примеров первой ситуации мы знаем множество; всякий раз, когда нас посещает новая идея, позволяющая по-иному взглянуть на приводящий в недоумение комплекс фактов, такая вероятность легко может стать явью. А что второй вариант? Знаем ли мы примеры? Что это за явления, которые не выдерживают проверки математикой?

Наука успешно справляется с проблемами, в решении которых требуется скорее техника, нежели проницательность. Под первой мы понимаем систематическое применение последовательной процедуры. Тот факт, что этот подход зачастую приносит плоды, свидетельствует о силе обобщения. Природа использует одну и ту же базовую идею снова и снова в

разных ситуациях. Отличительным знаком этих повторных применений является их математический характер. Поиск "теории всего" – это поиск техники, применение которой позволяло бы расшифровывать все сообщения, посылаемые природой. Но мы знаем, что должна существовать ситуация, где одной только техникой обойтись нельзя.

Американский логик Джон Майхилл предложил метафорическое расширение уроков, преподнесенных нам теоремами Гёделя, Черча и Тьюринга. Оно касается широты охвата и ограничений, присущих логическим системам. Самые доступные и количественно выражаемые аспекты мироздания обладают свойством вычислимости. Существует конкретная процедура определения того, обладает та либо иная кандидатура требуемым свойством. Можно научиться реагировать на его присутствие или отсутствие. Истинность не относится к этой категории свойств, а вот когда мы говорим о простых числах, "простота" является именно таким свойством. Более эфемерным представляется комплекс свойств, которые являются лишь перечислимыми. Для них мы можем построить процедуру, которая перечисляет все величины, обладающие необходимым свойством (даже если потребуется ждать бесконечно долго, когда этот список закончится), но нет способа систематически генерировать все сущности, не обладающие нужным свойством. Большинству логических систем присуще свойство перечислимости, но не вычислимости: теоремы можно перечислять, но нет автоматической процедуры, позволяющей проанализировать высказывание и решить, является ли оно теоремой. Если бы математический мир не имел теоремы Гёделя, тогда каждое свойство какой угодно системы, включающей в себя арифметику, было бы перечислимым. Мы могли бы написать определенную программу для выполнения любой операции. Без ограничений на вычислимость, наложенных Черчем и Тьюрингом, всякое свойство мира было бы вычислимым. Мы можем определить, что данная страница написана на таком-то языке, значит, эта ситуация относится к вычислимым. Достаточно сверить используемые слова со словарем соответствующего языка и грамматические конструкции – с правилами грамматики. Но тот же самый текст покажется бессмыслицей человеку, не знающему данного языка. Однако с течением времени язык можно выучить, и тогда слова приобретут смысл. Но никак нельзя заранее предсказать, какие именно слова и их части станут осмысленными. Свойство осмысленности является перечислимым, но не вычислимым.

Не каждое свойство мироздания является перечислимым или вычислимым. Например, такое свойство, как истинность высказывания в

рамках конкретной математической системы, не является ни перечислимым, ни вы числимым. Можно приближаться к истине со все боль шей точностью, вводя дополнительные правила рассуждений и все новые аксиоматические предпосылки, но никаким конечным набором правил истину ухватить нельзя. Эти так называемые предполагаемые атрибуты не обладают ни свойством перечислимости, ни вычисли мости, и потому их нельзя ни распознать, ни генерировать последовательностью логических шагов. Подход к ним требует изобретательности и новизны, их нельзя охватить каким-то конечным набором правил или законов. Майхилл напоминает, что красота, простота, истина относятся именно к этой категории свойств. Не существует магической формулы, с помощью которой можно было бы перебрать все возможные вариации этих предполагаемых качеств. Они неистощимы. Никакая программа, никакое уравнение не способны генерировать все формы красоты или уродства. Кроме того, нет верного способа точно идентифицировать эти качества, когда вы наткнетесь на них. Ограничения математики и логики не позволяют справиться с данными свойствами чисто техническими методами, даже если у нас имеются привычные представления о красоте и уродстве. Предполагаемые свойства вещей невозможно объяснить никакой логической "теорией всего". Никакое "непоэтическое" описание действительности не может быть полным.

Пределы охвата "теорий всего" бесконечны, но все-таки не всеобъемлющи; "теория всего" является необходимой, но далеко не достаточной частью полного понимания сути процессов во Вселенной. На страницах этой книги мы увидели, что сохраняется надежда узнать о единстве Вселенной с помощью "теории всего" и каким образом данная концепция может содержать элементы, помогающие нам преодолеть нынешний разрозненный взгляд на составляющие природу компоненты. Также мы узнали, что Вселенная не ограничивается "всем", что мы видим вокруг себя. В отличие от многих других миров, которые можно вообразить, наш мир содержит "предполагаемые" элементы. "Теория всего" не поможет предсказать их, однако, странным образом, многие из этих элементов сами используются в отборе и одобрении эстетически приемлемой "теории всего".

Не существует формулы, которая сообщила бы нам всю правду, всю гармонию, всю простоту. Никакая "теория всего" не обеспечит полное знание. Ибо если мы постигнем все, нам не останется что-либо понимать.

Содержание

Увлекательное путешествие... Обращаясь к ключевому вопросу современной физической науки, Барроу сводит его к фундаментальным азам.

«Kirkus Reviews»

Очень полезная книга интеллектуальных приключений.

«BBC FOCUS»

Так называемая «теория всего», которая открывает любые тайны Вселенной, давно уже стала главным предметом поиска для физиков-теоретиков, занимающихся изучением структуры космоса. Но как могла бы выглядеть такая теория? Она действительно способна описать и объяснить всё?

А если нет, то каковы ее рамки? 1/1 как она увяжется с тем, что нам уже известно на тему хаоса и неопределенности?

Джон Барроу знакомит нас с новейшими концепциями, которые появляются в теоретической физике и в перспективе могли бы оказаться составляющими «теории всего», от рассуждений о мире как о компьютерной программе до новаторских идей о самоорганизации и новых формах сложных систем. Мы увидим, как много интересных теорий рождает поиск «теории всего», как много новых вопросов он поднимает и как все это помогает нам глубже проникнуть в тайны космоса и понять наше собственное место в нем.

Джон Барроу — профессор математики, глава проекта «Millenium» в Кембриджском университете, член Королевского общества. Главной сферой его научных интересов является космология, его перу принадлежит множество научно-популярных книг, разъясняющих природу и значение современных открытий и достижений в области физики, астрономии и математики.

Увлекательное путешествие... Обращаясь к ключевому вопросу современной физической науки, Барроу сводит его к фундаментальным азам.

«Kirkus Reviews»

Очень полезная книга интеллектуальных приключений.

«BBC Focus»

Так называемая «теория всего», которая открывает любые тайны Вселенной, давно уже стала главным предметом поиска для физиков-теоретиков, занимающихся изучением структуры космоса. Но как могла бы выглядеть такая теория? Она действительно способна описать и объяснить всё? А если нет, то каковы ее рамки? И как она увяжется с тем, что нам уже известно на тему хаоса и неопределенности?

Джон Барроу знакомит нас с новейшими концепциями, которые появляются в теоретической физике и в перспективе могли бы оказаться составляющими «теории всего», от рассуждений о мире как о компьютерной программе до новаторских идей о самоорганизации и новых формах сложных систем. Мы увидим, как много интересных теорий рождает поиск «теории всего», как много новых вопросов он поднимает и как все это помогает нам глубже проникнуть в тайны космоса и понять наше собственное место в нем.

Джон Барроу — профессор математики, глава проекта «Millenium» в Кембриджском университете, член Королевского общества. Главной сферой его научных интересов является космология, его перу принадлежит множество научно-популярных книг, разъясняющих природу и значение современных открытий и достижений в области физики, астрономии и математики.

